INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
UN NUEVO PLANCTON | FÍSICA DEL IMPULSO NERVIOSO | EL ENIGMA DE LAS EXPLOSIONES DE RADIO
N.º 501
JUNIO 2018

ASTRONOMÍA
El enigma de las explosiones de radio

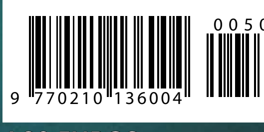
NEUROCIENCIA
Nueva hipótesis sobre comunicación neuronal

CAMBIO CLIMÁTICO
Colapso récord en el océano Ártico

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Junio 2018 InvestigacionyCiencia.es
Edición española de Scientific American

UN NUEVO PLANCTON

MIXÓTROFOS:
CAZAN COMO ANIMALES
CRECEN COMO PLANTAS
DOMINAN EL MAR



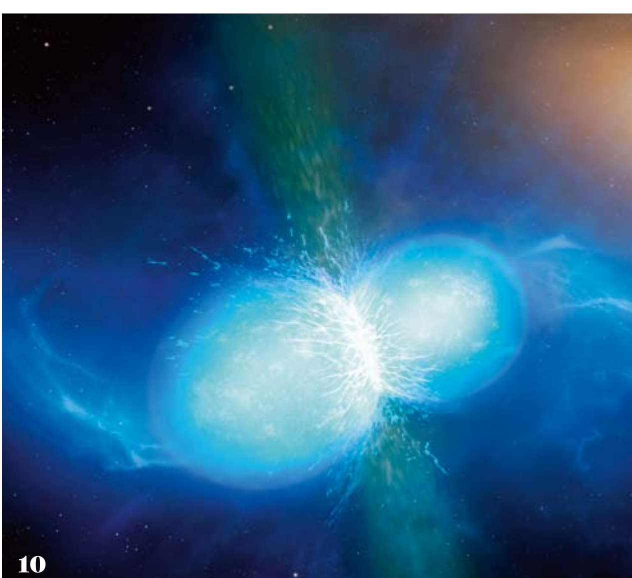
6,90 EUROS



ARTÍCULOS



7



10



86

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Nuevos estudios están demostrando que los mixótrofos, un tipo de plancton microscópico que en el pasado se había considerado una rareza, ejercen una enorme influencia en las redes tróficas de los océanos. Estos seres híbridos cazan como animales y fotosintetizan como plantas. En la imagen, un mixótrofo denominado *Dinophysis* (*derecha*) se alimenta de la parte interna de otro llamado *Mesodium*. Ilustración de Mark Ross Studios.



redaccion@investigacionyciencia.es



Marzo 2018

LA POLÉMICA DEL GLIFOSATO

En el artículo «¿Es cancerígeno el glifosato? [Investigación y Ciencia, marzo de 2018] Manolis Kogevinas señala, en contra de lo que indican agencias reguladoras de todo el mundo, que el glifosato es un «probable carcinógeno». El artículo resulta parcial e induce a la confusión, puesto que las autoridades científicas competentes han declarado que el glifosato no es cancerígeno. Al respecto, es importante precisar varios aspectos.

La Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC), que no es una autoridad reguladora, es la única que establece esta conclusión. Ninguna autoridad reguladora del mundo ha clasificado el glifosato como cancerígeno. En 2017, la Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas (ECHA) concluyó que el glifosato no es cancerígeno, mutagénico ni tóxico para la reproducción (echa.europa.eu/es/-/glyphosate-not-classified-as-a-carcinogen-by-echa), en consecuencia con las 90.000 páginas de pruebas existentes y 3300 estudios revisados. La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2015.4302), la Organización Mundial de la Salud (www.who.int/foodsafety/jmprsummary2016.pdf), el Instituto Federal Alemán para la Evaluación del Riesgo (www.bfr.bund.de/en/a-z_index/glyphosate-193962.html), la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (www.regulations.gov/document?D=EPA-HQ-OPP-2016-0385-0094) y otros organismos reguladores, como los de Canadá, Japón, Australia y Nueva Zelanda, entre otros, coinciden de forma unánime en que el glifosato es seguro conforme a las indicaciones de uso autorizadas.

En el artículo se hacen menciones y omisiones que distorsionan la realidad. Primero, se referencia un estudio realizado entre más de 50.000 trabajadores agrícolas señalando que las conclusiones relacionan el glifosato con un tipo de leucemia. Sin embargo, se omite que el propio estudio señala que el resultado no es estadísticamente significativo y que el fenómeno solo se aprecia en un grupo de población. Ese trabajo era conocido por el director del grupo de estudio del glifosato en la IARC, Aaron Blair, pero no fue considerado en la evaluación. Blair declaró en sede judicial que, si la IARC hubiese tenido en cuenta ese estudio, la clasificación de esta agencia sobre el glifosato habría sido distinta y no se habría considerado como probable carcinógeno (www.reuters.com/investigates/special-report/glyphosate-cancer-data).

Segundo, se omite que uno de los principales investigadores del glifosato en la IARC, Christopher Portier, reconoció en sede judicial que había recibido grandes sumas de dinero de abogados demandantes en EE.UU. contra compañías fabricantes de glifosato (risk-monger.com/2017/10/13/greed-lies-and-glyphosate-the-portier-papers) y que, la misma semana que la IARC publicaba sus conclusiones, Portier firmaba un contrato con dos firmas de abogados que iban a demandar a Monsanto en nombre de supuestas víctimas por cáncer del glifosato. El contrato incluía una cláusula para no revelar que estaba siendo pagado para aportar sus opiniones respecto al glifosato y que emprendió una campaña frente a las instituciones europeas en contra de este producto. También reconoció que mantuvo contacto con estos despachos de abogados antes de que la IARC hiciese pública la clasificación del glifosato.

Por último, en investigaciones periodísticas llevadas a cabo por la agencia Reuters, se desveló que la IARC realizó, desestimó y editó en el borrador de la clasificación del glifosato observaciones que estaban en desacuerdo con la conclusión de que esta sustancia podía ser clasificada como probable carcinógena (www.reuters.com/article/us-who-iarc-glyphosate-specialreport/in-glyphosate-review-who-cancer-agency-edited-out-non-carcinogenic-findings-idUSKBN1CO251).

Hay que aceptar el criterio de las autoridades científicas competentes de las que nos hemos dotado, que son las que nos dan seguridad a los ciudadanos.

Carlos Palomar
Director general de AEPLA
(Asociación empresarial de fabricantes de productos fitosanitarios en España)

Responde Kogevinas: *La carta del Sr. Palomar repite sin ningún sentido crítico las informaciones erróneas propagadas por varios sectores, en lugar de interesarse en evaluar cómo podría reducirse la exposición poblacional a un agente fitosanitario que muy probablemente es tóxico. La carta está plagada de errores que ya se han contestado ampliamente en varios medios. Es también muy preocupante ver cómo los grandes productores pueden influir en los medios de comunicación: el artículo referenciado de Reuters es pésimo. Lo más preocupante es que los productores de un herbicida ampliamente utilizado, en lugar de trabajar conjuntamente con los científicos para reducir los riesgos, solo atacan a quienes pueden cuestionar sus productos. Esa no es manera de avanzar en la prevención de la enfermedad y la promoción de la salud.*

Erratum corrige

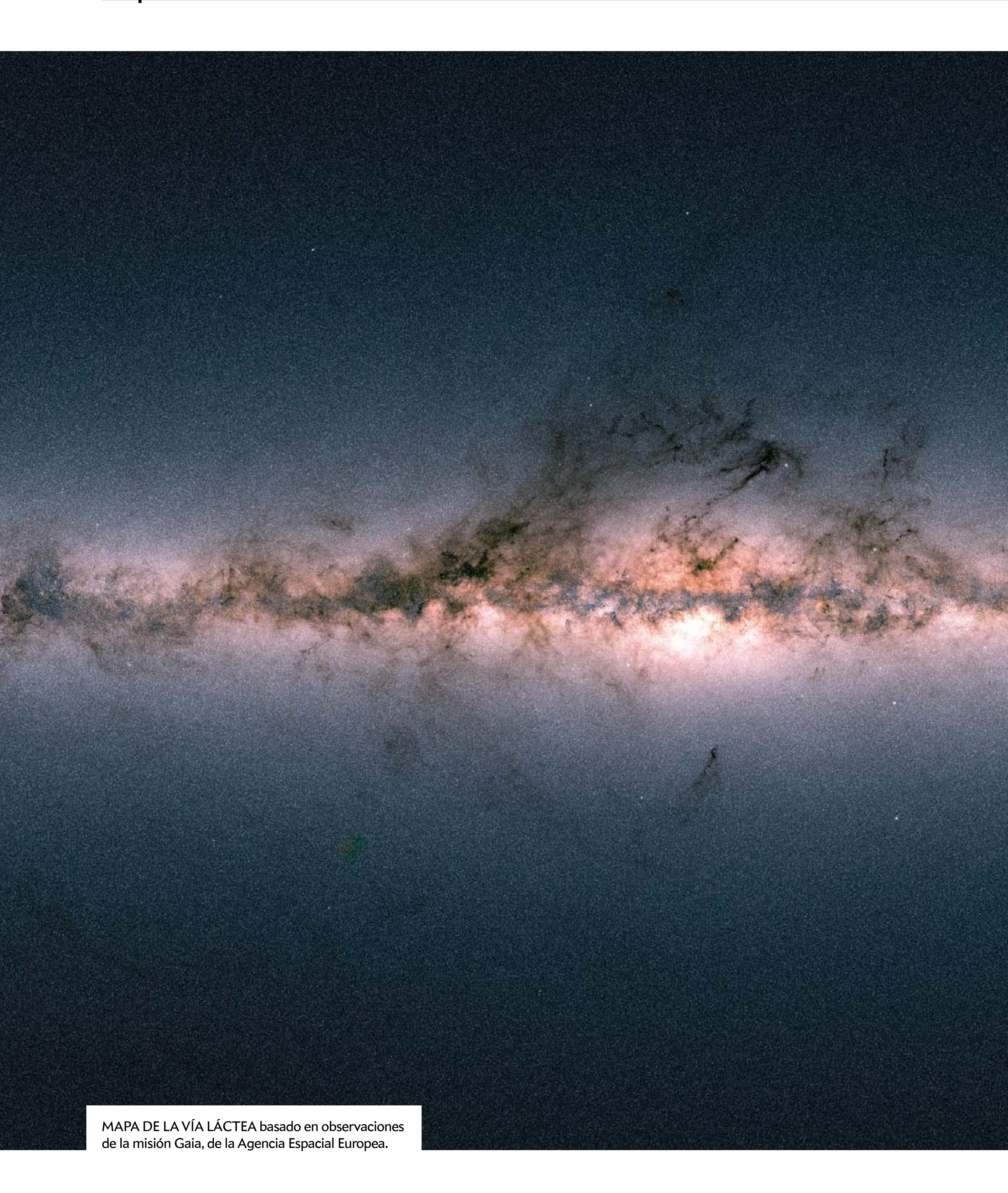
En **Variaciones sobre un tema inconmensurable** [Bartolo Luque; Investigación y Ciencia, abril de 2018] se afirmaba que, «en base 3, el último dígito de un cuadrado perfecto (distinto de 0) es siempre 1». Como apunta nuestro lector Marcos Gibert Robles, esta redacción se presta a equívocos, pues da a entender que, en base 3, todos los cuadrados perfectos no triviales terminan en 1, lo que no es el caso (por ejemplo, 9 en base 3 es 100). Una redacción más acertada hubiera sido: «La ecuación $a^2 = 2b^2$ no puede tener soluciones enteras distintas de 0 porque, en base 3, el último dígito distinto de 0 de un cuadrado perfecto es siempre 1, mientras que el último dígito distinto de 0 del doble de un cuadrado perfecto es siempre 2».

Esta ambigüedad ha sido subsanada en la versión digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



MAPA DE LA VÍA LÁCTEA basado en observaciones de la misión Gaia, de la Agencia Espacial Europea.





AGENCIA ESPACIAL EUROPEA, GAIA, Y CONSORCIO DE ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS

ASTRONOMÍA

Un nuevo mapa de la Vía Láctea

Los datos del satélite europeo Gaia ofrecen una imagen sin precedentes de las estrellas de nuestra galaxia

La Agencia Espacial Europea ha creado el mapa tridimensional más grande y preciso de la Vía Láctea, un avance que se esperaba con impaciencia. Gaia, una misión con un coste de unos mil millones de euros, publicó el pasado abril su primer gran conjunto de datos, los cuales detallan las posiciones y los movimientos de más de mil millones de estrellas de la galaxia.

La nave espacial Gaia, lanzada en 2013, barre todo el cielo desde su punto de mira orbital, situado sobre el lado de la Tierra opuesto al Sol. Su revolucionario mapa se basa en 25 observaciones distintas de las estrellas individuales y sus movimientos, realizadas durante aproximadamente dos años, e incluye una muestra representativa (un uno por ciento) de los astros de la Vía Láctea. Los datos, descritos en una serie de artículos publicados en la revista *Astronomy & Astrophysics*, pueden extrapolarse para simular el pasado y el futuro de la galaxia. «Estamos obteniendo un mapa en un momento dado, pero también podemos retroceder y avanzar en el tiempo», explica Jos de Bruijne, científico adjunto del proyecto Gaia.

Gaia publicó su primer conjunto de datos en septiembre de 2016. Pero, debido al limitado tiempo de observación y a que el proceso dependía del conocimiento previo de las posiciones celestes, aquel mapa solo daba cuenta de las distancias y los movimientos de dos millones de estrellas. El segundo conjunto de datos contie-

ne detalles similares de 1300 millones de astros, 650 veces más que la colección original.

El telescopio puede observar de manera precisa estrellas en el centro galáctico, a distancias de hasta 30.000 años luz, lo que equivaldría a distinguir desde la Tierra una moneda de dos céntimos en la superficie de la Luna. «Lo que hace que esta misión sea tan revolucionaria es la precisión de los movimientos propios medidos por Gaia», comenta Allyson Sheffield, astrofísica del Colegio Universitario LaGuardia, en Nueva York, que no participó en el proyecto.

Los dos telescopios ópticos y los tres instrumentos científicos de Gaia también pueden medir el brillo, la temperatura y la composición de las estrellas. El nuevo conjunto de datos incluye también los colores de los astros, los cuales pueden revelar detalles cruciales sobre su edad y temperatura superficial. Estas observaciones tan diversas convierten a la nave espacial en una especie de «ventanilla única a la estructura galáctica», en palabras de Sheffield.

Los datos incluyen asimismo las velocidades radiales (correspondientes a los movimientos en dirección a la Tierra o alejándose de ella) de seis millones de estrellas. Este tipo de mediciones permiten calcular la velocidad de los astros con respecto al Sol, lo que a su vez revela más detalles acerca de cómo podría haber evolucionado la galaxia. Y, por si fuera poco, Gaia ha efectuado observaciones de 14.099 asteroides del sistema solar.

El conocimiento preciso de los movimientos estelares no solo permitirá comprender mejor la historia y la evolución de la galaxia, sino que también podría ofrecer pistas sobre la naturaleza y la distribución de la enigmática materia oscura, así como poner a prueba teorías alternativas de la gravedad, apunta Amina Helmi, astrofísica del Instituto Astronómico Kapteyn, en los Países Bajos, e integrante de la misión Gaia.

—Jeremy Hsu

+ Información en nuestra web: **bit.ly/2IiCGfR**

EDUCACIÓN

Naturaleza y educación ambiental

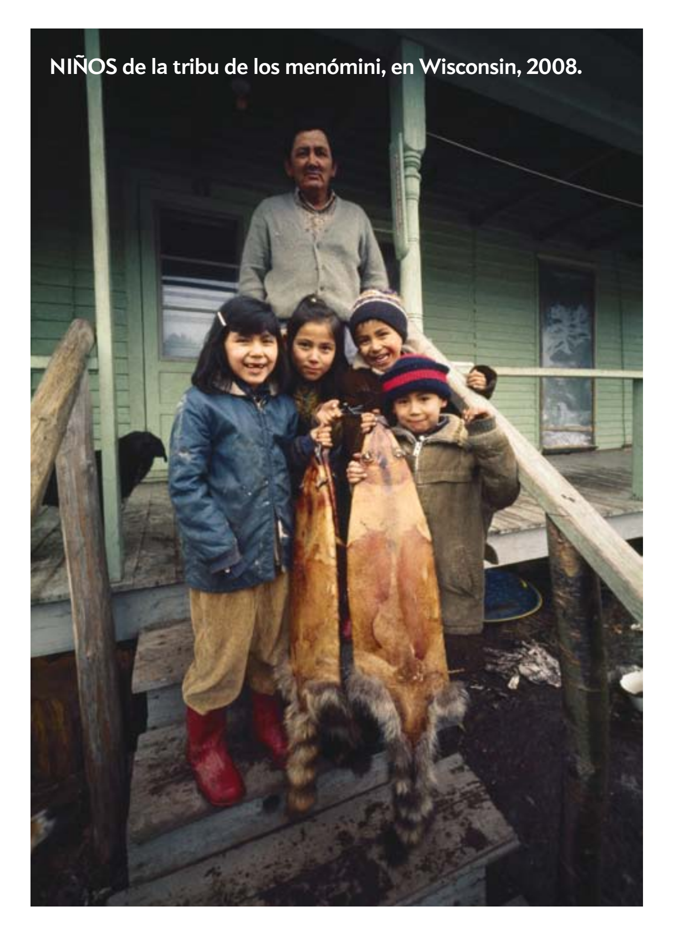
Los niños de distintas culturas ven el entorno natural de forma diferente

¿Cómo entienden los niños pequeños la naturaleza? La mayoría de las investigaciones acerca de esta cuestión ha tenido como protagonistas a niños estadounidenses, de clase media y raza blanca que viven en entornos urbanos próximos a grandes centros universitarios. Incluso cuando los psicólogos incluyen niños de otras comunidades, con demasiada frecuencia recurren a métodos experimentales concebidos para niños que viven en la ciudad. Por fin se ha elaborado una metodología destinada al estudio de los niños amerindios que viven en entornos rurales y de su visión de la naturaleza, cuyas respuestas se han comparado con las de sus iguales urbanos. Los resultados brindan una rara visión intercultural de la educación ambiental durante la primera infancia.

Sandra Waxman, especialista en psicología del desarrollo en la Universidad del Noroeste, y sus colaboradores mantienen una dilatada colaboración con los menómini, una tribu amerindia de Wisconsin. Cuando los autores presentaron los planes del estudio a los miembros de la tribu que habían sido formados como ayudantes de investigación, estos discreparon porque en su opinión el experimento —que implicaba la observación de los niños jugando con figuras de animales— no era culturalmente apropiado. A ojos de los menómini resulta absurdo pensar en los animales como en algo disociado de su entorno natural, asegura Waxman.

En lugar de ello, uno de los investigadores nativos construyó un diorama que contaba con árboles, prados y rocas de gran realismo, además de los animales de juguete en cuestión. Los investigadores observaron cómo jugaban con él tres grupos de niños de cuatro años: menóminis de origen rural, otros amerindios y, por último, otros estadounidenses que vivían en Chicago y sus alrededores.

Los tres grupos prefirieron los escenarios realistas y los animales de juguete a los escenarios imaginarios. Pero los dos grupos de niños amerindios eran más propensos a imaginar que ellos mismos eran los animales, antes que conferir atributos humanos a estos. Y los menómini rurales resultaron especialmente locuaces durante el experimento, en contraste con investigaciones previas que los habían calificado como menos habladores que sus iguales no amerindios. Los resultados se publicaron el pasado noviembre en *Journal of Cognition and Development*.



NIÑOS de la tribu de los menómini, en Wisconsin, 2008.

«La participación de las comunidades tribales en todos los aspectos de la investigación (planificación, diseño, ejecución, análisis y divulgación del estudio) debe ser el requisito mínimo para toda investigación que competa a los amerindios», afirma Corey Welch, director del programa académico STEM de la Universidad Estatal de Iowa y, a la sazón, miembro de los cheyenes del norte.

—Jason G. Goldman

STEVEN L. RAYMER, GETTY IMAGES

1

LARVAS DE ABEJAS OBRERAS (*1*) y eclosión de una abeja melífera (*2*).

FISIOLOGÍA ANIMAL

Hedor de muerte

Ciertos olores empujan a las abejas melíferas a retirar sus bajas

Hace doce años, los apicultores comenzaron a denunciar que sus enjambres de abejas (*Apis mellifera*) estaban muriendo a un ritmo alarmante. Desde entonces se han descubierto varias razones, pero «las enfermedades son, con creces, la principal causa de los problemas de salud que afligen a la abeja en este momento», asegura Leonard Foster, catedrático de bioquímica y biología molecular en la Universidad de la Columbia Británica. Estos insectos himenópteros sufren los estragos de males como la varroasis, causada por ácaros parásitos, o la loque americana, provocada por bacterias. Ahora, un nuevo estudio revela que el olor de las abejas muertas podría servir para reconocer y criar colonias más sanas.

Se sabe desde hace tiempo que las abejas retiran las crías (larvas) muertas o enfermas con el fin de contener la propagación de los patógenos por el enjambre. La investigadora apícola de la misma universidad y directora del estudio Alison McAfee, junto con Foster y otros colaboradores, pretendía averiguar por qué algunos enjambres son más meticulosos con esa depuración que otros. Eligieron dos sustancias producidas de forma natural por las abejas, el ácido oleico y el beta-ocimeno, cuyo olor creían que podría actuar como señal de limpieza. Muchos insectos desprenden ácido oleico al morir y las larvas de abeja segregan beta-ocimeno para avisar de que tienen hambre. Las jóvenes liberan ambos compuestos cuando mueren.

2



Los investigadores efectuaron una serie de pruebas para determinar si esos olores estaban vinculados con la conducta higiénica. En un experimento, añadieron ácido oleico y beta-ocimeno a larvas vivas que crecían en las celdillas de un panal, con la pretensión de engañar a las obreras y hacerles creer que habían muerto. Las obreras se deshicieron de más ocupantes de las celdillas impregnadas con la mezcla de ambas sustancias que de las expuestas a uno solo de los olores o a una sustancia de control, según describió el equipo el pasado abril en *Scientific Reports*. Creen que el beta-ocimeno empujó a las obreras a atender a las crías y que el ácido oleico las incitó a retirar las «muertas».

El equipo también halló un vínculo entre los olores y los rasgos genéticos que favorecen el comportamiento higiénico de las abejas. Puesto que algunas parecen responder más intensamente a los olores de «muerte» que les incitan a limpiar, estos hallazgos podrían facilitar la selección de las abejas más predispuestas a mantener la higiene. «El hecho de que posean un mecanismo que detecte esos olores —y que ese mecanismo parezca realmente ligado a su genética— resulta muy interesante», opina Jay Evans, investigador del Ministerio de Agricultura de EE.UU., que no ha participado en el estudio. «Si se confirmara, dispondríamos de un modo de cuantificar ese rasgo, de modo que los apicultores podrían seleccionar una variedad de abejas por su aptitud higiénica.»

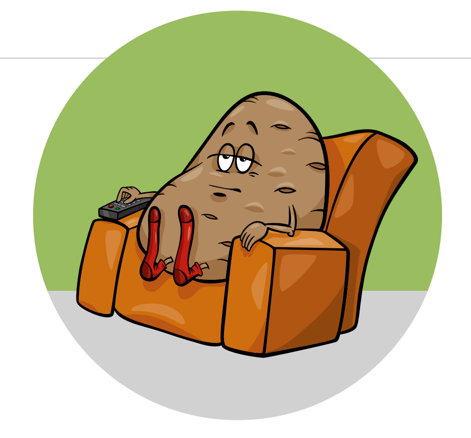
—Annie Sneed

GETTY IMAGES (1); INGO ARNDT, GETTY IMAGES (2)

SALUD

Perezosos gruñones

La inactividad prolongada puede agriar el carácter



Hace tiempo que el sedentarismo se vincula con ciertos problemas de salud, pero un creciente volumen de pruebas plantea ahora que podría influir también en la personalidad. Investigaciones pretéritas hallaron ciertas asociaciones entre la falta de ejercicio y el deterioro en rasgos del carácter, como la responsabilidad, valorados entre cuatro y diez años después de la primera encuesta. Ahora, el mayor análisis de su tipo hasta la fecha ha prolongado el seguimiento durante períodos aún más largos para confirmar esos vínculos y revela que persisten por espacio de casi dos décadas.

Un grupo encabezado por el psicólogo Yannick Stephan, de la Universidad de Montpellier, llegó a semejante conclusión tras combinar los datos de dos grandes estudios basados en encuestas. El Estudio Longitudinal de Wisconsin (WLS, por sus siglas en inglés) sometió a seguimiento a personas que se habían graduado en institutos de educación secundaria de ese estado en 1957, así como a algunos de sus hermanos. El estudio sobre la Mediana Edad en Estados Unidos (MIDUS) reclutó habitantes de todo el país. Los participantes de ambos han rellenado cuestionarios de personalidad desde que fueran inscritos por primera vez durante los años noventa, y respondieron preguntas referentes a sus hábitos de ejercicio y su salud.

Casi veinte años después, cerca de 9000 personas volvieron a someterse a las mismas encuestas. Stephan y su equipo constataron que las personas que afirmaban ser más sedentarias presentaban en promedio mayores reducciones de su responsabilidad, apertura a la experiencia, amabilidad y extroversión (cuatro de los llamados cinco grandes rasgos básicos de la personalidad), incluso teniendo en cuenta las diferencias iniciales entre ellas en cuanto a la personalidad y el estado de salud. No se ha observado ningún vínculo con el quinto rasgo, el neuroticismo (equilibrio emocional). Los cambios son pequeños, pero el vínculo con la actividad física es relativamente estrecho. Esta predijo mejor el cambio de personalidad que todas las enfermedades sufridas, por ejemplo. Los resultados se publicaron en abril en *Journal of Research in Personality*.

Numerosos mecanismos podrían estar implicados, desde factores fisiológicos, como la respuesta al estrés, hasta cambios en la capacidad física, todos los cuales pueden alterar la sociabilidad de las personas. «La personalidad es, en parte, lo que hacemos reiteradamente, por lo que los cambios de hábitos pueden traducirse en cambios de la personalidad», afirma Markus Jokela, epidemiólogo de la Universidad de Helsinki, ajeno al nuevo estudio.

Pero la relación no implica causa. Otros factores, como la genética o los acontecimientos que vivimos en los primeros años de vida, influirían en la actividad física y en la personalidad. Los resultados tendrán que ser reproducidos en muestras procedentes de culturas distintas y en estudios que hagan uso de medidas objetivas de los hábitos activos.

Con todo, el nuevo análisis saca a relucir la idea de que la personalidad es maleable a lo largo de la vida. Asimismo, concuerda con estudios que la vinculan con la salud. «Esos resultados recalcan la necesidad de fomentar la actividad física en la mediana y la tercera edad», explica Stephan.

—Simon Makin

PALEONTOLOGÍA

Mares asfixiados

Determinan el factor que acabó con el 95 por ciento de la vida marina durante la extinción del Pérmico-Triásico

La mayor extinción que ha sufrido la Tierra se conoce en ocasiones como «la Gran Mortandad». Y hay buenos motivos para ello: exterminó el 70 por ciento de la vida en tierra firme y el 95 por ciento de la marina. Hace tiempo que se cita el intenso vulcanismo en la actual Siberia como el principal culpable del cataclismo ocurrido hace 252 millones de años, también conocido como extinción masiva del Pérmico-Triásico. Ahora, un nuevo estudio ha identificado algunos detalles cruciales del mecanismo que acabó con la vida, al menos con la marina: los océanos de todo el mundo se quedaron sin oxígeno.

Los científicos ya sospechaban con anterioridad que la anoxia, o falta de oxígeno, fue la responsable de destruir la vida acuática. Los datos en favor de esta hipótesis provenían de las rocas marinas que se formaron en el antiguo océano Tetis. Sin embargo, eso comprendía solo alrededor del 15 por ciento de los mares de la Tierra, lo que no basta para decir algo concluyente sobre todo el mundo marino, señala Feifei Zhang, geoquímico de la Universidad Estatal de Arizona y líder de la investigación. «Nuestros datos apuntan a una intensificación rápida y global de la anoxia marina», señala el experto.

La clave del hallazgo, publicado en abril en la revista *Geology*, se encuentra en un nuevo método que usa mediciones de uranio en las rocas para inferir los antiguos niveles de oxígeno en los océanos. Esta técnica ha permitido hallar indicios en rocas de Japón que se formaron hacia la época de la extinción en el seno del océano Panthalassa, que por entonces abarcaba casi todo el planeta y contenía la mayor parte de su agua salada. «Lo más emocionante es la huella global que están viendo», dice Gregory Brennecka, geoquímico de la alemana Universidad de Münster que no participó en el estudio.

Estos descubrimientos podrían tener especial relevancia en nuestros días, ya que es probable que el desencadenante de aquella anoxia fuera el cambio climático causado por el CO_2 expulsado por los volcanes de Siberia. Y hoy, a medida que la actividad humana calienta el planeta, los océanos contienen menos oxígeno del que albergaban hace decenios. Brennecka no es partidario de conjeturar sobre el futuro, pero añade: «Creo que está bastante claro que, cuando se producen cambios a gran escala en los océanos, la vida se resiente».

—Lucas Joel

QUÍMICA

Extravagante grafeno

El versátil alótropo del carbono ya augura varias aplicaciones cotidianas

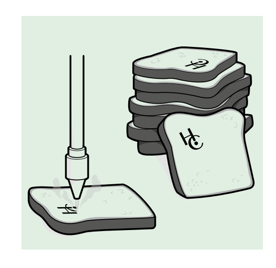
Los beneficios del grafeno parecen no tener fin. Este material, que consiste en una capa de carbono de un solo átomo de grosor y que constituye la unidad básica del grafito, es conocido por su resistencia, conductividad y otras propiedades útiles. Se muestra prometedor de cara a multitud de aplicaciones futuristas, desde baterías de gran capacidad hasta alas de avión más ligeras y resistentes. Poco a poco se está abriendo paso en el mercado, en tintas conductoras y equipamiento deportivo de alto rendimiento. Pero otros posibles usos están más cerca del hogar: algunos investigadores piensan que el grafeno podría modernizarlo todo, desde el cuidado personal hasta el calzado.



NANOTINTE PARA EL PELO

Las láminas de grafeno pueden adherirse unas a otras y verse negras, como el grafito. ¿Podrían usarse para teñir el pelo? Para averiguarlo, Jiaxing Huang y sus colaboradores de la Universidad del Noroeste de EE.UU. mezclaron «copos» de grafeno en agua con quitosano, un azúcar comestible hecho con caparazones de crustáceos. Cuando aplicaron el tinte resultante sobre muestras de cabello rubio, los flexibles copos se enrollaron firmemente alrededor de la superficie curva de los pelos: el quitosano se unió con la queratina, una proteína del cabello, fijando así el carbono. El colorante duró 30 lavados, según el artículo publicado en abril por los investigadores en la revista *Chem*.

Los tintes permanentes comerciales funcionan con varios productos que pueden dañar el cabello e irritar la piel. Aunque todavía se están estudiando los posibles riesgos del grafeno para la salud y el entorno, el nuevo tinte no es abrasivo y los copos son demasiado grandes para penetrar en los poros, observa Huang. Además, la resistencia del material a la carga electrostática le otorga un atractivo efecto secundario: combate el encrespamiento.



ETIQUETAS ELECTRÓNICAS

Cuando un láser incide sobre tejidos o alimentos, los carboniza. Llevando a cabo este proceso de manera controlada, un grupo de investigadores ha logrado reorganizar los átomos de carbono presentes en materiales naturales para formar grafeno. Como se describe en un estudio publicado en línea el pasado febrero en *ACS Nano*, los científicos inscribieron patrones de grafeno en tela, papel e incluso pan. Esta técnica podría usarse para grabar circuitos electrónicos que actúen como etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID) biodegradables, las cuales permitirían controlar prendas de ropa o billetes de banco. También podría producir sensores comestibles que indiquen si la fruta está madura o contaminada.

James Tour, químico de la Universidad Rice y autor principal del estudio, explica que la intensa luz y calor del láser reordena los átomos de carbono y hace que se formen enlaces entre ellos. La clave es dar varios pases: un primer pulso chamusca el material, creando carbón amorfo u hollín, mientras que los pases posteriores organizan los átomos con la característica geometría hexagonal del grafeno.



CALZADO TECNOLÓGICO

Este mismo año podrían llegar a los comercios unas zapatillas de grafeno con agarre extra. La compañía británica de ropa deportiva Inov-8 planea vender zapatillas para correr con suelas de goma que incorporan el prodigioso material, lo que debería hacerlas más resistentes y flexibles.

La firma italiana de calzado Fadel ha ido un paso más allá. En colaboración con investigadores del Instituto Italiano de Tecnología de Génova, la empresa ha añadido grafeno a las suelas y plantillas de sus sandalias Freshoes. Este material confiere supuestamente propiedades antimicrobianas y disipa el calor, manteniendo los pies sanos y frescos. —*Prachi Patel*

BENJAMIN HELD, UNIVERSIDAD DE MINNESOTA; MUSEO GEOMINERO (*ámbar*)

AGENDA

CONFERENCIAS

4, 15 y 22 de junio
Charlas Feynman UAB
Universidad Autónoma de Barcelona
Barcelona
www.feynmantotal.cat

7 de junio
Los grandes descubrimientos accidentales
Sheldon Lee Glashow, premio nóbel de física 1979
CosmoCaixa
Barcelona
www.cosmocaixa.com

12 de junio
El olfato
José Ramón Alonso, Universidad de Salamanca
Club de prensa asturiana
La Nueva España
Oviedo
www.csic.es/agenda

EXPOSICIONES

Amberia: El ámbar de Iberia
Museo Geominero
Madrid
www.igme.es/Museo



OTROS

5 de junio — Jornada
Consumo de antibióticos y transmisión de resistencia entre humanos y animales: ¿un riesgo real?
Fundación Ramón Areces
Madrid
www.fundacionareces.es

9 y 10 de junio — Curso
Fábrica de robótica
Para niños de 8 a 14 años
La Casa Encendida
Madrid
www.lacasaencendida.es

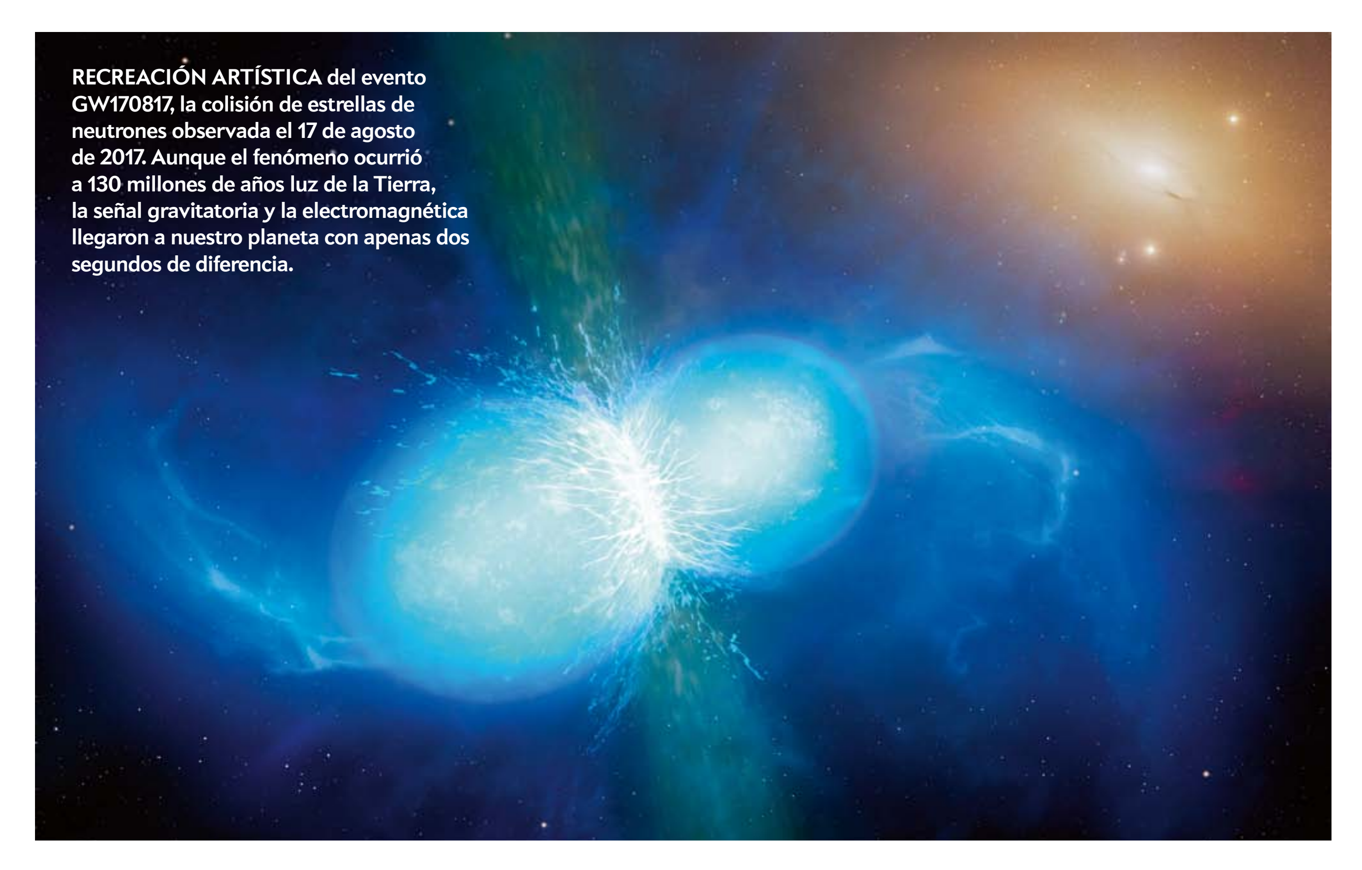
Hasta el 15 de junio — Concurso
Ciencia ficción en la UPC
Narraciones de ciencia ficción
Universidad Politécnica de Cataluña
www.upc.edu/consellsocial

FÍSICA FUNDAMENTAL

Las teorías de la gravedad tras la tormenta cósmica

La detección simultánea de la luz y las ondas gravitacionales procedentes de una colisión de estrellas de neutrones ha permitido descartar múltiples modelos teóricos que aspiraban a explicar la energía oscura

MIGUEL ZUMALACÁRREGUI PÉREZ



RECREACIÓN ARTÍSTICA del evento GW170817, la colisión de estrellas de neutrones observada el 17 de agosto de 2017. Aunque el fenómeno ocurrió a 130 millones de años luz de la Tierra, la señal gravitatoria y la electromagnética llegaron a nuestro planeta con apenas dos segundos de diferencia.

UNIVERSIDAD DE WARWICK/MARK GARLICK

El 17 de agosto de 2017 tuvo lugar un acontecimiento histórico. Por primera vez, varios observatorios de todo el mundo detectaron de manera simultánea las ondas gravitacionales y la radiación electromagnética provenientes de un mismo fenómeno astrofísico. El suceso en cuestión fue una colisión de estrellas de neutrones ocurrida en una galaxia lejana, a unos 130 millones de años luz de la Tierra. A pesar de la gran distancia recorrida, ambas señales, la gravitatoria y la electromagnética, llegaron a nuestro planeta casi al mismo tiempo, con poco menos de dos segundos de diferencia.

Aquello confirmaba con una precisión asombrosa una predicción clave de la teoría de la relatividad general de Einstein: que las ondas gravitacionales viajan a la misma velocidad que la luz. Por simple que parezca, este resultado permite abordar desde una nueva perspectiva uno de los mayores problemas a los que se enfrenta la cosmología moderna: desentrañar la naturaleza de la energía oscura, el misterioso agente responsable de la expansión acelerada del universo.

En los últimos años, los intentos por explicar la energía oscura han llevado a la formulación de varias teorías de la gravedad alternativas a la de Einstein. En muchas de ellas, la luz y la radiación gravitatoria no se propagan a la misma velocidad, por lo que el evento registrado en 2017 nos ha permitido descartarlas. En un trabajo publicado a finales del año pasado en *Physical Review Letters*, José María Ezquiaga, del Instituto de Física Teórica de Madrid, y el autor de este artículo analizamos con detalle qué clase de modelos quedaban invalidados tras el fenómeno observado en agosto de 2017. Como veremos, el conjunto de teorías que podrían dar cuenta de la energía oscura se ve drásticamente reducido, lo que indica la necesidad de nuevas ideas.

Rayos y truenos cósmicos

La gravedad es algo tan cotidiano que resulta fácil olvidarla. No fue hasta 1686 cuando Newton entendió que la fuerza que nos mantiene unidos al suelo es también la responsable del movimiento de los

planetas. La teoría de Newton permite predecir eclipses, calcular la trayectoria de proyectiles o enviar robots a Marte. Pero, a pesar de sus éxitos, en 1915 Einstein presentó una teoría de la gravedad que extendía la de Newton. Una de las consecuencias más importantes de la teoría de Einstein es que el universo no es estático, sino que se expande con el paso del tiempo.

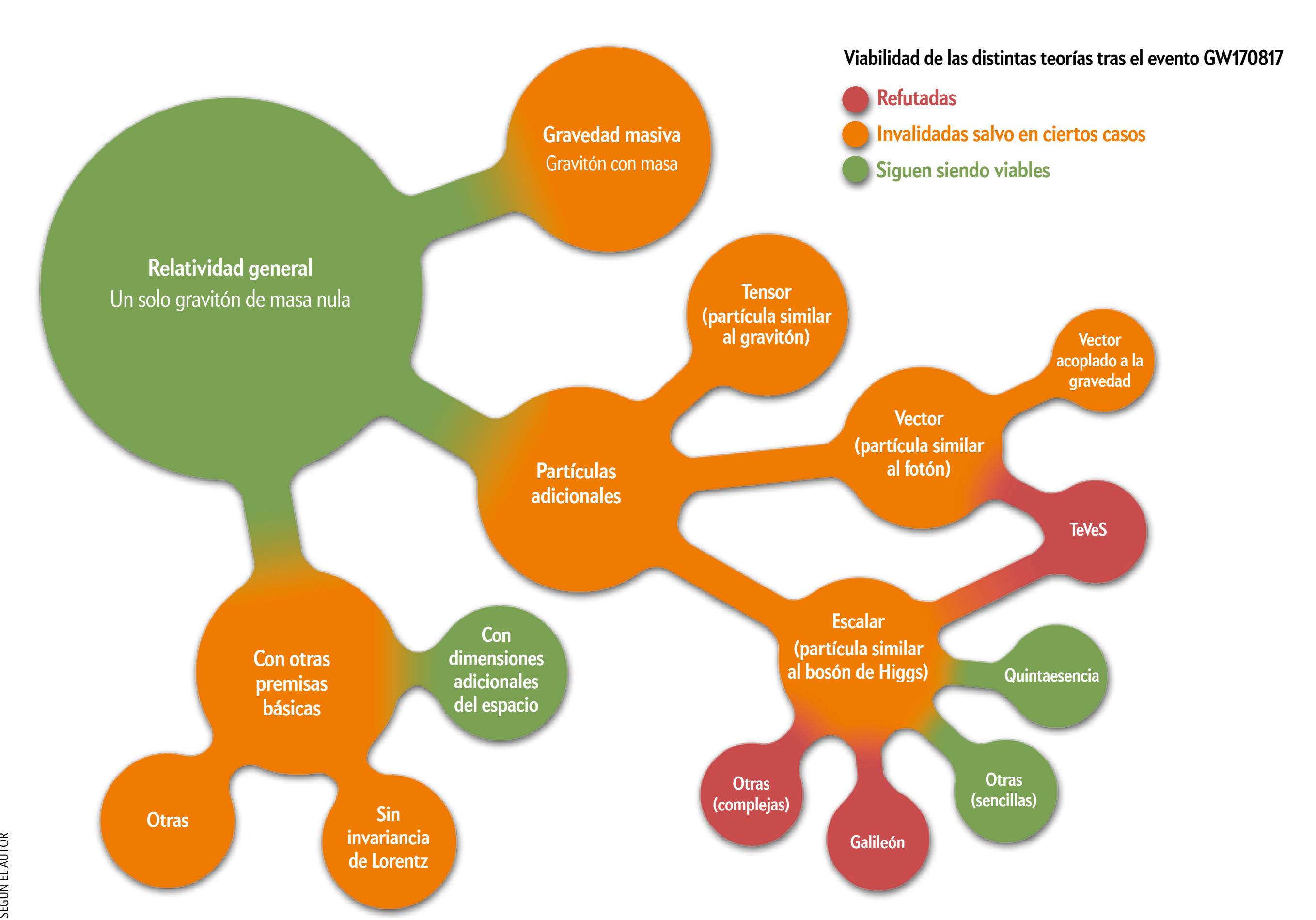
Desde hace unas décadas, sabemos que las formas de materia y energía que conocemos (los átomos, la luz y ciertas partículas, como los neutrinos) tan solo representan el 5 por ciento de la energía total del cosmos. El resto corresponde a la materia oscura (el 25 por ciento) y a la energía oscura (70 por ciento), dos componentes de los que solo conocemos su abundancia y algunas propiedades básicas. En concreto, la energía oscura ejerce un efecto repulsivo (contrario al de la gravedad) que hace que, en contra de lo esperado, la expansión del universo proceda cada vez más rápido.

Hasta hace muy poco, la observación del cosmos se había basado exclusivamente en la detección de radiación electromagnética. En 2015, sin embargo, nuestra imagen del universo comenzó a completarse gracias a un nuevo tipo de fenómeno: las ondas gravitacionales. Detectadas por primera vez por el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO), en EE.UU., estas señales consisten en pequeñas distorsiones del espaciotiempo que se propagan en forma de ondas. Se generan en grandes cantidades en ciertos procesos astrofísicos violentos, como las colisiones de agujeros negros o de estrellas de neutrones.

Hasta el año pasado, todas las ondas gravitacionales detectadas procedían de procesos de fusión de agujeros negros. Dado que estos objetos no dejan escapar la luz, tales eventos no se vieron acompañados de ninguna señal electromagnética. A modo de metáfora, podemos decir que habíamos oído los truenos de una tormenta pero sin ver ningún rayo.

Las estrellas de neutrones, sin embargo, sí emiten luz. Durante el fenómeno registrado en agosto de 2017, bautizado como GW170817 por la fecha en que se detectó, se observó, además de la señal gravitatoria, una explosión en todo el espectro electromagnético, desde los rayos gamma hasta las ondas de radio. Al disponer de ambas señales, el «rayo» y el «trueno», fue posible calcular por primera vez su velocidad relativa. Tras un viaje de 130 millones de años desde la galaxia de origen, ambas llegaron con 1,7 segundos de diferencia.

Para que ambas señales coincidan en un intervalo de pocos segundos (un retraso que puede explicarse con facilidad a partir del mecanismo que desencadena la explosión), la diferencia de velocidades



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN EL AUTOR

MAPA DE TEORÍAS: Para explicar ciertos fenómenos cosmológicos, como la naturaleza de la energía oscura, a lo largo de los años se han propuesto varias extensiones de la relatividad general. Muchas de ellas, sin embargo, predicen que las ondas gravitacionales se propagan a una velocidad diferente de la de la luz. Esta posibilidad quedó refutada el año pasado tras la observación de una colisión de estrellas de neutrones en una galaxia distante. Este diagrama simplificado muestra las grandes familias de teorías que aspiran a modificar la relatividad general y cuáles de ellas han quedado descartadas (*rojo*), cuáles son aún válidas en ciertos casos (*naranja*) y cuáles siguen siendo viables (*verde*).

no puede ser mayor que una parte en mil billones (10^{15}). Esta cifra se halla en perfecto acuerdo con la teoría de Einstein, según la cual las ondas gravitacionales viajan exactamente a la velocidad de la luz. No obstante, esta igualdad se rompe en otras teorías de la gravedad, algunas de las cuales podrían explicar la expansión acelerada del universo.

Gravedades alternativas

La manera más sencilla de explicar la aceleración cósmica consiste en postular una densidad de energía constante tanto en el espacio como en el tiempo. Esta «constante cosmológica» ejerce un efecto gravitatorio repulsivo a gran escala, lo que acelera la expansión del universo una vez que la materia (que tiene un efecto atractivo y, por tanto, frena la expansión) se ha diluido lo suficiente.

No obstante, la constante cosmológica no es la única explicación posible. Una segunda posibilidad reside en que esa densidad de energía corresponda a un nuevo tipo de campo escalar (el tipo de campo más simple posible, del mismo tipo que el asociado al bosón de Higgs), apodado «quintaesencia», el cual podría cambiar con el tiempo. Por último, una tercera opción plantea que la quintaesencia interaccione de manera directa con la gravedad y modifique la teoría de Einstein.

Hasta la fecha se han propuesto varias teorías de gravedad modificada con distintos niveles de complejidad. Aparte de describir de manera distinta la expansión del universo, cada una de ellas implica una serie de «efectos secundarios». Predecir tales fenómenos y compararlos con los datos constituye una parte importante de la investigación en energía oscura. Este proceso avanza de manera muy gradual cuando los efectos son sutiles; no es raro que pasen años hasta que un modelo queda descartado. En cambio, medir la velocidad de propagación de las ondas gravitacionales constituye un test fulminante: todas las teorías que predecían una velocidad distinta a la de la luz han quedado refutadas de inmediato.

No resulta extraño que señales de distinto tipo se propaguen a velocidades diferentes o que incluso lo hagan a una velocidad variable. Durante una tormenta, por ejemplo, oímos el trueno después de haber visto el rayo, y sabemos también que la velocidad del sonido depende de factores como la temperatura, la humedad o la presión atmosférica. No obstante, este tipo de efectos suelen darse en medios complejos, como el aire, pero no resulta habitual encontrarlos en una teoría fundamental, como la gravedad. Para modificar la velocidad de las ondas gravitacionales, el campo responsable de la energía oscura tendría que actuar como un medio material —distinto del vacío— a través del cual viajasen las ondas.

Sin embargo, algunas teorías que predicen alteraciones en la velocidad a la que se propagan las ondas gravitacionales poseen otras propiedades que las convierten en modelos excelentes de energía oscura. Un ejemplo que ha ganado fama en los últimos años es la teoría conocida como «galileón», la cual surgió al estudiar el comportamiento de la gravedad en presencia de dimensiones adicionales del espacio. En su formulación original, el campo asociado a la energía oscura describe la forma en que nuestro universo se encuentra inmerso en un espaciotiempo de cinco dimensiones (cuatro espaciales más el tiempo). En este contexto, la aceleración cósmica se debe a que la gravedad se debilita al «diluirse» en la quinta dimensión. La formulación actual del galileón, publicada en 2009 por Alberto Nicolis, de la Universidad de Columbia, Riccardo Rattazzi, de la Escuela Politécnica de Lausana, y Enrico Trincherini, de la Escuela Normal Superior de Pisa, mantiene el mismo tipo de campo pero prescinde de la quinta dimensión.

La teoría del galileón logra explicar una gran variedad de observaciones cosmológicas. No obstante, lo consigue solo en aquellos casos en los que la velocidad de las ondas gravitacionales se ve modificada de manera sustancial, pudiendo ser desde un 99 por ciento menor que la de la luz hasta un 25 por ciento mayor. En la colisión de estrellas de neutrones observada el año pasado, una diferencia de tan solo un 1 por ciento habría supuesto un retraso de más de un millón de años entre la señal luminosa y la gravitatoria. Por tanto, si tales teorías fueran ciertas, una detección simultánea habría sido imposible.

Nuevas ideas

La velocidad de las ondas gravitacionales nos indica caminos que podemos explorar. Aún son viables muchos modelos sencillos, como el de la quintaesencia, pero otros más complejos quedan descartados: tal es el caso del galileón, así como el de la teoría conocida como TeVeS («tensor-vector-escalar»), la cual intenta explicar la materia oscura mediante una teoría modificada de la gravedad.

En teorías con campos escalares, además de modelos sencillos, como la quintaesencia, existen solo dos teorías en las que la velocidad de las ondas gravitacionales puede ajustarse para que sea igual a la de la luz. Los escalares son los campos más sencillos, por lo que otras teorías más refinadas sí ofrecen esperanza. Un ejemplo es la gravedad masiva, la cual asigna una masa distinta de cero al gravitón, la partícula responsable de transmitir la gravedad. Esta resultaría compatible con los resultados sobre la velocidad de propagación de las ondas gravitacionales si la masa del gravitón fuese lo suficientemente pequeña. Por desgracia, estas teorías presentan otras dificultades, y aún no se ha encontrado un modelo que describa de manera satisfactoria el universo que observamos.

La detección simultánea de luz y ondas gravitacionales procedentes de un mismo sistema físico ha supuesto el mayor avance en el estudio de la energía oscura desde su detección hace veinte años. Al reducir drásticamente el conjunto de modelos teóricos posibles, resulta mucho más sencillo estudiar en detalle aquellos que sí siguen siendo viables. Nunca ha habido un momento mejor para volver a nuestras pizarras a buscar nuevas ideas e intentar explicar nuestro extraño y fascinante universo.

Miguel Zumalacárregui Pérez
es investigador Marie Curie Global en la Universidad de California en Berkeley.

PARA SABER MÁS

Galileon as a local modification of gravity. Alberto Nicolis, Riccardo Rattazzi y Enrico Trincherini en *Physical Review D*, vol. 79, art. n.º 064036, marzo de 2009.
GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. Colaboraciones LIGO y Virgo en *Physical Review Letters*, vol. 119, art. n.º 161101, octubre de 2017.
Dark energy after GW170817: Dead ends and the road ahead. José María Ezquiaga y Miguel Zumalacárregui en *Physical Review Letters*, vol. 119, art. n.º 251304, diciembre de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

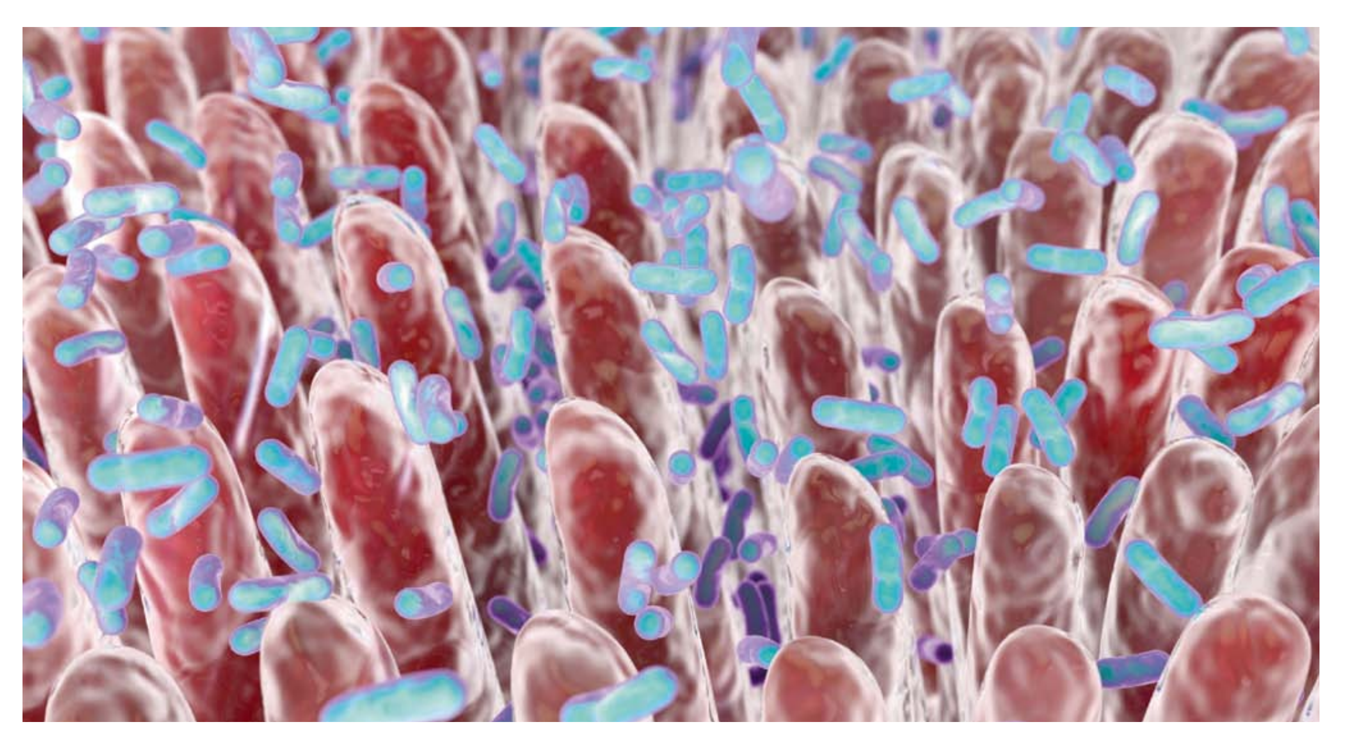
Salir de la oscuridad. Georgi Dvali en *IyC*, abril de 2004.
El rompecabezas de la energía oscura. Adam G. Riess y Mario Livio en *IyC*, mayo de 2016.
La observación de ondas gravitacionales con LIGO. Alicia Sintes y Borja Sorazu en *IyC*, febrero de 2017.

BIOTECNOLOGÍA

Ecografías para examinar microorganismos intestinales

La modificación de bacterias para que puedan monitorizarse mediante ultrasonidos ofrece la posibilidad de explorar microbios en zonas profundas del organismo

RICARD SOLÉ Y NÚRIA CONDE-PUEYO



LA COMUNIDAD MICROBIANA que habita entre las vellosidades del intestino resulta difícil de estudiar debido a su profunda ubicación en el organismo. Ahora se ha ideado un método para seguir el destino de bacterias introducidas en animales vivos con fines terapéuticos.

En el interior de nuestro cuerpo existe un ecosistema microbiano tan rico y complejo como la selva tropical. Al igual que ella, nuestro organismo alberga universos inaccesibles que suelen permanecer ocultos. Cuando se intenta observar el intestino in vivo, uno de los problemas principales es que las técnicas de imagen basadas en la luz solo permiten examinar zonas a una profundidad limitada. Pero hace poco, el laboratorio de Michael Mikhail G. Shapiro, del Instituto de Tecnología de California, ha descrito en la revista *Nature* un método ecográfico para explorar este mundo interno y lo usan para cartografiar la ubicación in vivo de ciertas poblaciones celulares microbianas. En algunos procedimientos médicos actuales o en desarrollo se emplean células bacterianas para tratar enfermedades intestinales o cáncer; esta técnica ultrasónica, pues, podría adaptarse al ámbito clínico para determinar si dichas células han llegado al sitio deseado.

Vesículas de gas reveladoras

Las comunidades microbianas han estado coevolucionando con el ser humano durante millones de años y presentan una organización con regularidades espaciales y temporales destacables. Este ecosistema natural se crea al nacer, evoluciona, reacciona frente a alteraciones y agresiones y, a veces, puede quebrarse. No obstante, establecer las leyes y debilidades de la vida escondida en las profundidades del intestino ha resultado complicado; incluso algunas de las mejores técnicas de imagen de todo el cuerpo solo permiten mostrar estructuras que se sitúan a unos pocos centímetros bajo la piel.

El grupo de Shapiro ofrece una solución innovadora. Hasta ahora, la ecografía se ha empleado principalmente para evaluar los tejidos, pero los autores exponen que también puede servir para rastrear poblaciones bacterianas modificadas genéticamente para que expresen lo que ellos llaman genes marcadores acústicos. Estos genes codifican ciertos componentes de unas estructuras intracelulares con envoltura proteica y llenas de gas denominadas vesículas de gas. Las presentan de forma innata numerosos microorganismos, y con ellas controlan su flotabilidad en medios acuosos.

En la ecografía, se aplican impulsos de ondas acústicas a una muestra y se detectan los ecos reflejados, que se ven afectados por las diferencias de densidad de las sustancias que atraviesa el sonido. Las vesículas de gas dispersan las ondas acústicas, por lo que los organismos que las contienen pueden descubrirse mediante ultrasonidos. Los impulsos de presión por encima de cierto nivel pro-

vocan la ruptura de las vesículas de gas; por consiguiente, puede deducirse que la desaparición de las señales ultrasónicas tras este tipo de impulsos es fruto de la existencia de vesículas de gas, una estrategia que podría utilizarse para mejorar la detección de señales por encima de los niveles basales.

Anteriormente, no se había realizado ningún experimento para averiguar si las células que en condiciones normales no forman vesículas de gas podían manipularse genéticamente para que lo hicieran, lo que permitiría examinarlas mediante ultrasonidos. El grupo de Shapiro modificó varios tipos de microorganismos que hoy se utilizan con fines terapéuticos (o están en fase de desarrollo) para que expresaran componentes de las vesículas de gas. Uno de estos microbios fue una cepa no patógena de la bacteria *Escherichia coli* que se ofrece a algunas personas con infección intestinal. Otro fue la bacteria *Salmonella enterica* Typhimurium, que puede colonizar los tumores. Se están estudiando modelos de ratón de invasión tumoral por parte de *S. enterica* Typhimurium con el fin de determinar el potencial de estas bacterias para liberar fármacos antineoplásicos.

Los autores introdujeron bacterias genomodificadas que formaban vesículas de gas en el intestino del ratón, y demostraron que la técnica ecográfica funciona incluso si las poblaciones celulares están muy diluidas (detectaron concentraciones de 5×10^7 células por mililitro de *E. coli*). También lograron manipular cepas bacterianas para que generasen señales ultrasónicas distinguibles. Ello permite monitorizar dos poblaciones microbianas al mismo tiempo utilizando cepas cuyas vesículas se rompen al recibir impulsos de distinta presión.

Numerosas aplicaciones

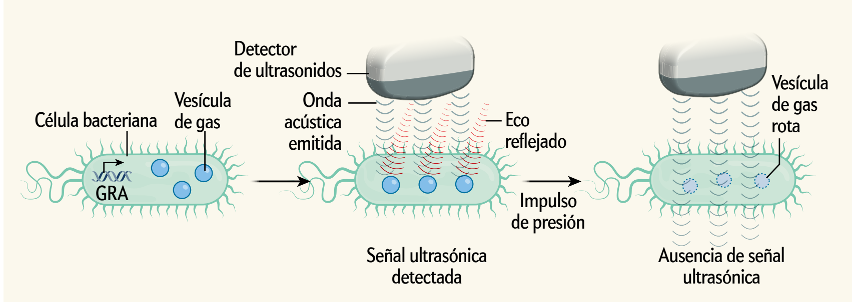
Los autores compararon dos estrategias para determinar la ubicación de bacterias genomodificadas: los ultrasonidos y un método que detecta las bacterias que expresan una molécula emisora de luz. Se sirvieron de cepas que viven en una región intestinal profunda difícil de visualizar con métodos ópticos. La técnica basada en ultrasonidos fue superior a la luminiscente. Las señales ultrasónicas procedentes de las bacterias aportaron una elevada resolución espacial y alcanzaron zonas profundas que no pudieron observarse mediante el método luminiscente. Con los ultrasonidos, los autores detectaron bacterias que recubrían la superficie del colon y que presentaban concentraciones parecidas a las empleadas en los tratamientos.

Los sistemas de obtención de imágenes in vivo que permiten examinar en tiempo real bacterias luminiscentes colonizadoras de tumores en ratones son efectivos para monitorizar neoplasias que se ubican justo debajo de la piel, pero resultan poco útiles para explorar zonas más internas. El nuevo método ecográfico proporciona buenas imágenes de cepas manipuladas de *S. enterica* Typhimurium que residen en el centro de un tumor murino interno (un adenocarcinoma ovárico) formado a partir de células cancerosas de ovario humano trasplantadas.

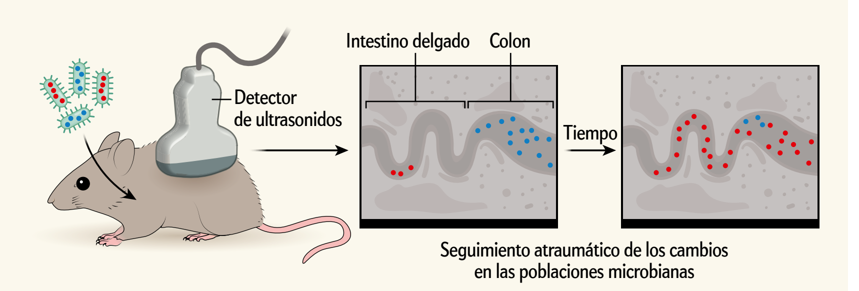
Esta técnica ultrasónica también podría ayudar a validar y ajustar tratamientos en los que se pretende actuar de forma selectiva sobre tumores mediante bacterias genomodificadas. La adquisición de imágenes in vivo constituye un elemento importante de la evaluación de estos tratamientos en modelos animales, así como la determinación de la dosis correcta y el cálculo de los tiempos de respuesta. Incluso en esta fase preliminar, se alberga la esperanza de que este método atraumático permita seguir en el tiempo la respuesta de un paciente a un tratamiento antineoplásico basado en bacterias. También podría proporcionar un instrumento para optimizar otras terapias y pruebas diagnósticas que se estén concibiendo; en concreto, aquellas en las que se apliquen métodos de biología sintética para crear células que expresen vías biológicas de las que suelen carecer ciertos tipos celulares.

ECOGRAFÍA MICROBIANA

UN NUEVO MÉTODO permite seguir in vivo poblaciones celulares que se ubican en zonas profundas del intestino del ratón y que no pueden examinarse mediante métodos ópticos.



Fundamento: Las bacterias se modifican genéticamente para que expresen genes de respuesta acústica (GRA), los cuales codifican los componentes de las vesículas de gas, unas estructuras celulares huecas; estas dispersan las ondas acústicas y generan un eco que puede captarse con un detector de ultrasonidos. La aplicación de impulsos de presión provoca la ruptura de las vesículas y la desaparición de la señal ultrasónica, lo que permite localizar las células que contienen vesículas de gas.



Posibles aplicaciones futuras: Con el nuevo método pueden distinguirse las células que contienen dos tipos de vesículas de gas (*rojas y azules*), las cuales se rompen con impulsos de distinta presión. Al introducir en un ratón dos cepas bacterianas con distintas vesículas se podría hacer un seguimiento temporal y espacial atraumático in vivo de la dinámica de las dos poblaciones microbianas en zonas como el intestino delgado o el colon.

Además, el método desarrollado por el grupo de Shapiro podría complementarse con otra técnica de imagen basada en el sonido, la de adquisición de imágenes fotoacústicas. En ella, los impulsos de luz o radiofrecuencia emitidos provocan una expansión térmica de los tejidos receptores que genera ondas acústicas. La integración de un sistema de obtención de imágenes fotoacústicas con el nuevo método tal vez permita determinar la ubicación exacta de las bacterias y, a la vez, facilitar información detallada in vivo del tejido circundante.

Es posible imaginar otras extensiones y aplicaciones del trabajo de Shapiro. Podrían diseñarse grupos de bacterias modificadas que produjeran una señal ultrasónica en respuesta a ciertas condiciones fisiológicas y ambientales en el intestino; o células bacterianas manipuladas para que diesen una respuesta al interactuar con las células intestinales, lo que permitiría monitorizar la biogeografía funcional del intestino. La capacidad de controlar de forma selectiva la expresión de los genes de respuesta acústica podría ser útil en el diseño de experimentos que pretendan examinar la colonización intestinal de bacterias recién introducidas u observar la destrucción de bacterias patógenas en el espacio y el tiempo durante un tratamiento.

Quizá la nueva técnica pueda utilizarse también para estudiar sistemas distintos del cuerpo, como los ecosistemas microbianos que habitan en suelos sanos o dañados. El suelo puede albergar una rica comunidad microbiana, y la ecología espacial de los microbios del suelo aún no se conoce del todo. La visión de Charles Darwin sobre las interacciones complejas entre organismos como un «matorral rivereño» resulta relevante tanto para los ecosistemas del suelo como para las comunidades celulares del intestino. Se necesitan herramientas de investigación flexibles para entender estos tipos de ecosistemas. Los futuros estudios basados en el trabajo de Shapiro que obtengan imágenes acústicas precisas de la dinámica espacial de las células podría suponer un paso adelante crucial.

Ricard Solé *es investigador ICREA en la Universidad Pompeu Fabra y miembro del Instituto Santa Fe, en Nuevo México.*

Núria Conde-Pueyo *es investigadora posdoctoral de la mencionada universidad.*

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 553, págs. 36-37, 2018. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2018

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

In vivo gene expression dynamics of tumor-targeted bacteria. T. Danino et al. *ACS Synthetic Biology*, vol. 1, págs. 465-470, 2012.
Biogenic gas nanostructures as ultrasonic molecular reporters. M. G. Shapiro et al. en *Nature Nanotechnology*, vol. 9, págs. 311-316, 2014.
Acoustic reporter genes for noninvasive imaging of microorganisms in mammalian hosts. R. W. Bourdeau et al. en *Nature*, vol. 553, págs. 86-90, 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

El ecosistema microbiano humano. Jennifer Ackerman en *IyC*, agosto de 2012.
Nuestro segundo genoma. Francisco Guarner en *IyC*, diciembre de 2012.
Factores que alteran el microbioma humano. Celia Méndez-García, Andrés Moya y Manuel Ferrer en *IyC*, diciembre de 2017.

ETOLOGÍA

Comunicación visual en la penumbra

Aves y mamíferos de hábitos nocturnos se sirven también de señales visuales en la oscuridad, además de las sonoras

MARÍA DEL MAR DELGADO Y VINCENZO PENTERIANI

La vida es una compleja red de relaciones entre organismos, y la supervivencia de cada individuo depende de su capacidad de extraer y transmitir información. Los animales han desarrollado una gran diversidad de estrategias para comunicarse. Entre ellas, la comunicación visual resulta de vital importancia para todas las especies, incluidas las nocturnas. Si bien durante muchos años hemos pensado que los animales nocturnos se comunicaban únicamente a través de señales vocales y químicas, trabajos recientes parecen contradecir esa idea.

Durante el día, el mundo es un lugar coloreado. La variabilidad en la coloración representa una forma muy común de comunicación visual. Pero, cuando la luz escasea, los colores se vuelven indistinguibles y entonces cobran importancia los contrastes entre ellos. Por esta razón, las especies nocturnas suelen presentar plumajes o pelajes acromáticos.

A pesar de su relevancia, la comunicación visual en los animales nocturnos es un campo de investigación que ha recibido poca atención. Recientemente, hemos escrito un artículo de revisión donde demostramos que el oscuro mundo nocturno está repleto de señales visuales. Sobre la base de ese trabajo, les invitamos a recorrer aquí un viaje por el amplio pero poco conocido mundo de las señales visuales en los animales nocturnos.

El lenguaje nocturno de las aves

Los búhos reales (*Bubo bubo*) cantan durante el crepúsculo, un tiempo con unas condiciones de luz muy específicas que modifican las estrategias de comunicación entre los animales. Esta rapaz presenta una mancha blanca en la garganta, zona que se dilata y se contrae sucesivamente durante los eventos vocales. Los búhos la utilizan como una señal de alto contraste respecto a la tenue luz del entorno, razón por la que cantan más en esas horas. Otras especies de aves también exhiben sus plu-

majes alares en el crepúsculo. Es el caso de los chotacabas cuelgacintas (*Semeiophorus vexillarius*) y los machos de la avutarda de Ludwig (*Neotis ludwigii*).

La comunicación visual en las aves nocturnas también viene modulada por los ciclos lunares. Los vuelos nupciales de la agachadiza japonesa (*Gallinago hardwickii*) no solo tienen lugar al amanecer y al atardecer, sino también a medianoche durante la fase de luna llena. Esta mayor actividad en esas noches podría deberse a las mayores posibilidades que tienen los machos de localizar a las hembras bajo el claro de luna, debido a las marcas blancas que estas presentan.

El plumaje acromático de numerosas aves nocturnas presenta patrones que varían de un individuo a otro. Estos funcionan como señales honestas, es decir, son indicadores de la calidad de los individuos. En la lechuza común (*Tyto alba*), esas señales guardan relación con la capacidad reproductora de las hembras, lo que influye en la selección de la pareja: los machos prefieren aparearse con hembras muy moteadas porque estas tienen una mayor descendencia. Los búhos reales también utilizan la mancha blanca de la garganta en la comunicación intersexual.

Además, los distintos patrones de plumaje ayudan a la comunicación entre los progenitores y sus crías. En el búho real, los polluelos con mejor condición física exhiben manchas más blancas alrededor del pico. Los polluelos del búho chico (*Otus scops*) presentan un pico que refleja luz ultravioleta; su grado de reflectancia está relacionado con la masa corporal.

Por último, algunas aves introducen elementos visibles en la oscuridad para marcar su territorio. Durante el período de apareamiento, los búhos reales depositan grandes cantidades de heces blancas cerca del nido, señales que resultan de utilidad para guiar hacia el lugar a los miembros de la pareja y para ahuyentar de él a los depredadores. Otro ejemplo del empleo de señales visuales para disuadir a posibles atacantes, una estrategia conocida como aposematismo, es el de los malaquitas (*Nectarinia famosa*), que muestran manchas que en la oscuridad parecen «ojos».

Estrategias de los mamíferos

Algunas especies crepusculares y nocturnas de mamíferos presentan también contrastes en su pelaje, como las marcas visibles en la región facial de los mustélidos, como las del tejón europeo (*Meles meles*). Algunos estudios han sugerido que estas máscaras podrían representar una coloración aposemática para desalentar a los depredadores.

Pero el aposematismo no puede aplicarse a todas las máscaras faciales, ya que estas también pueden funcionar como señales de dominancia durante la noche, una forma más con la que los individuos de una especie establecen vínculos sociales. Así lo hacen pensar los patrones de piel de algunas especies nocturnas pequeñas, como el falangero de cola plumosa (*Distoechurus pennatus*) o el lirón careto (*Eliomys quercinus*), los cuales deslumbran al amanecer y al atardecer. De manera similar a lo que sucede con varias especies de lémures diurnos, que muestran patrones de piel negra y blanca que sirven para la diferenciación entre individuos, estas especies nocturnas podrían aprovechar los contrastes de color en la piel como una forma de comunicación social.

Sin embargo, en ciertos mamíferos los patrones de la piel constituyen todavía un misterio. Es el caso de algunas especies de ratas africanas (pertenecientes a la familia Bathyergidae), que tienen una visión muy limitada pero aun así muestran marcas blancas en la cabeza. Estas podrían reflejar la necesidad de comunicarse en ambientes oscuros y, por lo tanto, la evolución de una forma de comunicación visual aún desconocida. Lo mismo ocurre con las líneas faciales blancas y negras de la vizcacha común (*Lagostomus maximus*), que podría corresponder a una señal aposemática para evitar la depredación. Independientemente de su fun-

MARIO MELLETTI





EN CONDICIONES DE BAJA INTENSIDAD LUMÍNICA, los contrastes adquieren más importancia que los colores. El búho real, la rapaz nocturna de mayor tamaño, exhibe una mancha blanca cuando canta. Esta se asemeja a un faro que se enciende y se apaga a cada ulular, sirviendo como señal visual para transmitir informaciones acerca del propio individuo.



© DAMIANKUZDAK/ISTOCKPHOTO

EN LOS MUSTÉLIDOS, como el tejón europeo (*Meles meles*), son frecuentes las máscaras faciales, que podrían servir como una señal disuasoria frente a posibles depredadores.

ción, todas estas especies parecen haber desarrollado formas similares de señales visuales para enviar información en condiciones de baja luminosidad.

Es importante mencionar otra peculiaridad de los mamíferos crepusculares y nocturnos: la visión ultravioleta. La sensibilidad a este tipo de luz, descubierta en los mamíferos solo hace dos décadas, es típica de pequeñas especies nocturnas. La posible función adaptativa de esta forma de visión puede ser la de mejorar la percepción visual en el crepúsculo. Por lo tanto, esta sensibilidad puede representar otra táctica aún inexplorada de comunicarse.

Si bien cada vez hay más pruebas de que numerosas especies nocturnas utilizan señales visuales, se necesitan más estudios para entender por qué han desarrollado este tipo de comunicación. Sabemos ahora que esta forma de relacionarse constituye un medio eficaz en las aves y los mamíferos, por lo que representa un campo muy prometedor para futuras investigaciones.

María del Mar Delgado
y ***Vincenzo Penteriani***
son investigadores de la Unidad Mixta de Investigación en Biodiversidad, de la Universidad de Oviedo y el CSIC.

PARA SABER MÁS

Living in the dark does not mean a blind life: Bird and mammal visual communication in dim light. V. Penteriani y M. M. Delgado en *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 372, n.º 1717, 2017.

BIOLOGÍA MARINA

EL PLANCTON VERSÁTIL

Los mixótrofos, diminutas criaturas acuáticas que cazan como animales y crecen como plantas, influyen en multitud de fenómenos, desde las poblaciones de peces hasta el ritmo del cambio climático

Aditee Mitra

Ilustración de Mark Ross Studios



PUNZADA ABSORBENTE: Un mixótrofo, *Dinophysis* (*derecha*), succiona los órganos fotosintéticos de otro, *Mesodinium*.

Aditee Mitra es especialista en mixótrofos y en otros organismos zooplanctónicos, así como en la modelización de la dinámica de los sistemas planctónicos. Imparte biología en la Universidad de Swansea, Gales.



El sol del verano centellea a través de las aguas templadas de la costa española. El mar se antoja relajado, en calma. Cerca de la superficie, imperceptible a simple vista, un enjambre de organismos planctónicos, unos de color rosa anaranjado y otros de verde oscuro, describe círculos lentamente mientras atrapa los rayos solares para transformar su energía en alimento mediante la fotosíntesis.

De improviso, una criatura tentaculada, un «gigante» de 22 micrómetros que empequeñece al plancton fotosintético con sus escasos 3 micrómetros, zigzaguea a través del líquido elemento mientras absorbe los glúcidos y los aminoácidos que se difunden desde los organismos de menor tamaño. Con sus tentáculos, *Mesodinium* captura y engulle a las desventuradas presas verdes, nanoflagelados, que son digeridas por completo.

Más selectivo, pero igualmente brutal, demuestra ser con las presas rosadas, denominadas criptófitos. Si bien destruye y digiere la mayor parte de la víctima, esta vez separa delicadamente los orgánulos responsables de la fotosíntesis. En pocos minutos, el traslúcido *Mesodinium* vira al rojo oscuro, a medida que llena su cuerpo con las partes robadas, cloroplastos y nucleosomas, que permanecen intactas y funcionales. Incapaz de asimilar el dióxido de carbono por sí solo como un auténtico fotosintetizador, depende de los cloroplastos de sus víctimas. La estrategia ambivalente de este depredador, consistente en cazar como un animal y fotosintetizar como una planta, se conoce como mixotrofia.

Pero *Mesodinium* no va a disfrutar tranquilamente de su botín durante mucho rato. Cerca acecha otro mixótrofo, algo mayor y con una técnica de caza diferente: el dinoflagelado *Dinophysis*. Este primero describe círculos en torno a él y luego le lanza filamentos en forma de arpón para inmovilizarlo. Luego, el captor le da el golpe de gracia: dirige hacia el cautivo un apéndice o pedúnculo, semejante en forma y función a una pajita, con el que succiona su contenido, incluido el cloroplasto robado. Esta fábrica fotosintética de tercera mano pasa a formar parte del nuevo hospedador y empieza a trabajar en el interior de *Dinophysis*, a quien suministrará energía vital. Los restos de su primer captor quedan a la deriva.

Estos depredadores unicelulares constituyen solo dos ejemplos de los incontables mixótrofos que pueblan los mares. Durante mucho tiempo, la mayoría de los biólogos marinos les restó importancia; meras curiosidades en comparación con los dos grupos multitudinarios del plancton unicelular, que se suponía dominaban la base de las redes tróficas marinas. El primero de ambos, el fitoplancton, de atributos vegetales, emplea la energía de la luz y los nutrientes inorgánicos como el nitrato para proliferar. El segundo, el zooplancton, afín a los animales, se alimenta del primero. Gracias a este último, los nutrientes circulan hacia las especies de mayor tamaño. En contraste con estos puristas, los mixótrofos eran considerados bichos raros, aprendices de todo y maestros de nada. Se conocían también contados ejemplos de mixótrofos terrestres, como las plantas insectívoras similares a la venus atrapamoscas.

Esta visión tradicional de las redes tróficas marinas resultaba equivocada. Por medio de experimentos, observaciones y modelización de las poblaciones planctónicas, nuestro equipo ha demostrado que la mayor parte del plancton unicelular no se comporta ni como plantas puras ni como depredadores estrictos. En realidad, el grueso de los organismos planctónicos unicelulares es mixótrofo. Esto implica un mecanismo de control

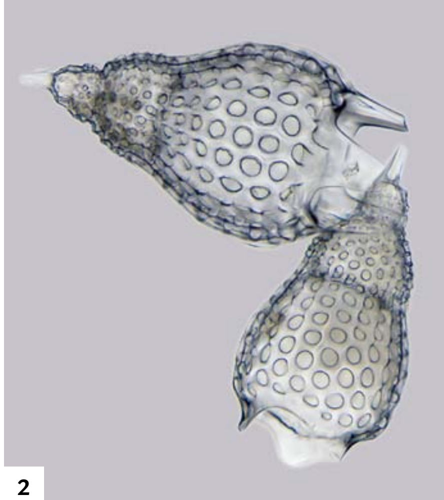
EN SÍNTESIS

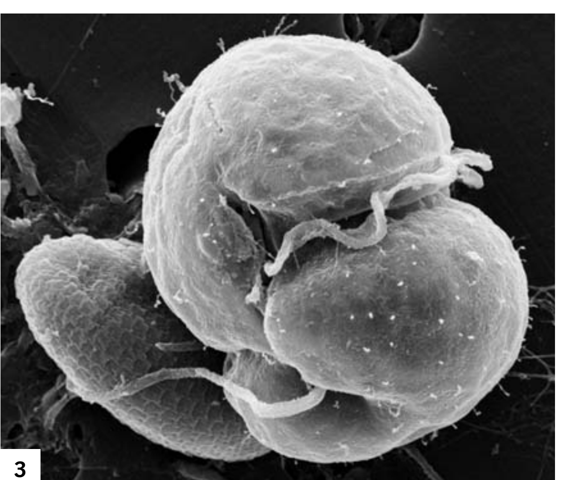
Se creía que la red trófica del océano, clave para el ecosistema planetario, dependía solo de dos grupos de organismos: el fitoplancton y el zooplancton.

Nuevos datos demuestran que gran parte del plancton está compuesto por «mixótrofos», capaces de emplear la energía solar como las plantas y de depredar como los animales para sobrevivir.

Estos microorganismos híbridos ejercen una enorme influencia en la abundancia global de carbono, las poblaciones de peces y las floraciones algales nocivas.

de la base de la pirámide trófica, y de todo lo que hay sobre ella, diferente del que pensábamos. Si el plancton está dominado principalmente por los mixótrofos, su abundancia no dependerá solo de la fotosíntesis, puesto que estos pueden medrar simplemente comiendo. Y cuando la energía solar está disponible, puede dar un impulso adicional al crecimiento de la población, basado inicialmente en la depredación. Las consecuencias de semejante facultad se extienden a muchos otros aspectos, desde la dinámica atmosférica hasta las poblaciones de peces. El incremento de la actividad de los mixótrofos, por ejemplo, influye en la velocidad a la que el océano transfiere el dióxido de carbono responsable del cambio climático desde el agua y el aire hacia los sedimentos marinos. Además, los mixótrofos son menos sensibles a las variaciones estacionales de la luz solar. Esa versatilidad y resiliencia trae consigo ventajas. Las poblaciones de mixótrofos beneficiosos pueden alimentar a un mayor número de larvas de peces e incrementar así una fuente de sustento básica para la humanidad. Pero también pueden acarrear consecuencias negativas. Algunas especies protagonizan proliferaciones masivas que son nocivas y obligan a clausurar las explotaciones de moluscos bivalvos, además de causar grandes mortandades de peces.





MONSTRUOS DIMINUTOS: Existen distintos tipos de mixótrofos. Algunos, como *Tripos longipes* (*1*), fotosintetizan por sí mismos y al mismo tiempo cazan. Los miembros del orden Nassellaria (*2*) arrebatan los órganos fotosintéticos a sus víctimas. Las especies de *Karlodinium* (*3*) se comportan igual que *T. longipes*.

ERIC GRAVE/SCIENCE SOURCE (1); FRANK FOX, mikro-foto.de (2); VINCENT LOVKO, LABORATORIO MARINO MOTE (3)

Si esta nueva perspectiva de la biología marina se confirmase, como apuntan los últimos descubrimientos de nuestro grupo y de otros investigadores, rebatiría una forma de entender la ecología del océano basada en la interrelación entre el plancton animal y el vegetal. Entre las olas surgiría un tercer actor, tan extraño como decisivo.

EL ATAQUE DE LOS TRÍFIDOS

Los mixótrofos parecen fruto de la ciencia ficción. Los arpones y pedúnculos de *Dinophysis* recuerdan, a escala minúscula, los atributos de las plantas que conquistaban el planeta en una famosa novela de ese género de los años cincuenta titulada *El día de los trífidos*, de John Wyndham. Los trífidos empleaban sus raíces para absorber nutrientes del suelo y caminar. Pero también poseían aguijones venenosos que lanzaban como látigos para cegar o matar a los seres humanos, de cuyos cadáveres descompuestos se alimentaban.

Oí hablar por primera vez del plancton mixótrofo hace poco más de una década, mientras trabajaba en mi tesis doctoral versada en el zooplancton microscópico, la fracción más diminuta del plancton animal. (El fitoplancton es aún más pequeño.) Los libros de texto definían a los mixótrofos como una rareza del mar. Pero, gracias a su versatilidad, que reúne en una misma célula la autotrofia (fotosíntesis) y la heterotrofia (depredación), se me presentaban como formas de vida perfectas. Y puesto que la evolución tiende a favorecer la eficiencia, me sorprendió que la mixotrofia no fuera más frecuente. Con el afán de saber más sobre ellos, hallé algunos trabajos muy interesantes publicados por Diane Stoecker, ecóloga del plancton que trabajaba en el Laboratorio de Horn Point, de la Universidad de Maryland. Afirmaba que los mixótrofos debían ser sumamente abundantes en el plancton marino. Contacté con ella y nuestra conversación me convenció de que debían estar ahí afuera. Pero, ¿cuántos eran y qué estaban haciendo?

Mi especialidad es la elaboración de modelos matemáticos de redes tróficas destinados a comprender el comportamiento de las especies que las integran. En suma, se trata de simulaciones que se ejecutan en un ordenador. Al rebuscar entre los modelos ecosistémicos del mar, no pude encontrar uno solo que simulara los pormenores de la doble vida de los mixótrofos. Tampoco pude reunir el dinero para un proyecto concebido con ese fin; las comisiones de evaluación no pensaban que los mixótrofos merecieran tal atención. Así que pasé a ganarme el sueldo como funcionaria del Gobierno local, encargada de la biodiversidad en Bidgend, Gales. Eso sí, pude dedicar las tardes a diseñar el modelo con la ayuda de mi esposo, el biólogo marino Kevin Flynn. En la primavera de 2009 ultimamos una primera simulación capaz de representar diferentes poblaciones de mixótrofos, unas con mayor actividad fotosintética y otras más dependientes de

la depredación. Ese mismo año apareció publicada en *Journal of Plankton Research*.

Nuestro objetivo era demostrar que con la incorporación del plancton de comportamiento doble sería posible simular el ecosistema marino con mayor realismo que otros modelos en que las poblaciones de plancton aparecían divididas entre las formas animales y vegetales. Modificamos las características de los mixótrofos hasta lograr simulaciones que reproducían las observaciones reales del flujo de nutrientes a lo largo de las redes tróficas, así como las interacciones con otros tipos de plancton, como las bacterias y unos crustáceos diminutos, los copépodos. La dinámica de estas redes, que publicamos en 2010 en *Journal of Marine Systems*, difería notablemente de la observada en los modelos con plancton segregado.

Sin embargo, necesitábamos ir más allá de las simulaciones informáticas. Debíamos recopilar pruebas que sustentaran nuestra hipótesis: que los mixótrofos regulan el flujo y el reflujo de los nutrientes en todos los confines del mar y que todos sus habitantes dependen de ello. Y por fin habíamos conseguido fondos. Impresionada por nuestros modelos, la fundación Leverhulme Trust sufragó una serie de encuentros en Estados Unidos y en Europa, donde por primera vez pudieron compartir sus conocimientos investigadores que habían trabajado con mixótrofos tanto en el medio natural como en el laboratorio.

Estas proliferaciones espumosas no son tóxicas, pero interceptan la luz solar, lo que altera el ciclo de nutrientes que suministra el alimento a las larvas de los peces. Menos floraciones significan más pesca

UN MUNDO HÍBRIDO

Durante el primer encuentro, celebrado en 2011, nuestro grupo, apodado por nosotros mismos como el «Equipo mixótrofo», compiló una lista de todas las especies de plancton conocidas que eran capaces de fotosintetizar y cazar al mismo tiempo. Durante décadas, los investigadores habían descubierto mixótrofos en muestras de aguas procedentes de todas las regiones marinas, desde la costa hasta el mar abierto y desde los polos hasta el ecuador. También habían realizado experimentos a bordo de buques oceanográficos. En algunos casos, habían llevado el plancton hasta sus laboratorios y efectuado otros experimentos con diferentes nutrientes, presas o intensidades luminosas con el fin de examinar cómo variaba su comportamiento en virtud de las condiciones ambientales. Pero hasta que nuestro grupo no recopiló toda aquella información, la mayoría de los estudiosos creía haber estado observando peculiaridades, en lugar de formas de vida habituales en el océano. Reunir todos aquellos datos nos llevó a la conclusión de que el mar estaba lleno de mixótrofos y que desempeñaban una función ecológica esencial. Por ejemplo, Per Juel Hansen, ecofisiólogo especialista en plancton de la Universidad de Copenhague, y sus colegas demostraron que, si no contaba con suficientes criptófitos como presa (el plancton rosa citado al inicio), la población de *Mesodinium* no lograba obtener suficientes cloroplastos y acababa declinando. Stoecker y su equipo, así como el grupo encabezado por Hae Jin Jeong, de la Universidad Nacional de Seúl, demostraron que los mixótrofos que practicaban la fotosíntesis devoraban plancton a un ritmo mayor que los que no lo hacían: una forma de alimentación estimulaba la otra. Y cuando la luz y los nutrientes abundaban, ese tipo concreto de mixótrofos se multiplicaba mucho más rápido que los dependientes de un único proceso.

En 2012 dimos otro paso más y, aparte de constatar la presencia de los mixótrofos en los ecosistemas marinos, empezamos a diferenciarlos según el tipo de presas, el método de captura y la modalidad de fotosíntesis. Conformaban cuatro clases, cada una ubicada en un segmento del espectro de comportamiento mixto.

El primer criterio para discriminar entre los diversos tipos de mixótrofos consistió en determinar el origen de su capacidad fotosintética. ¿Poseían la facultad inherente de captar la luz y sintetizar alimento, o estaban obligados a arrebatar los fotosistemas a sus presas? Denominamos mixótrofos constitutivos a los capaces de sintetizar los elementos necesarios de la fotosíntesis. Este grupo engloba numerosos microorganismos benignos y ecológicamente importantes que constituyen eslabones críticos en las redes tróficas marinas. Pero también alberga un montón de alborotadores. Podemos ver los efectos de su crecimiento descontrolado en las proliferaciones de algas nocivas. Por ejemplo, el mixótrofo *Karlodinium* es conocido por provocar mortandades de peces en todo el mundo, desde la bahía de Chesapeake hasta las aguas costeras de Malasia. *Prymnesium*, otro mixótrofo constitutivo responsable de tales mortandades en las costas de Texas y en las aguas remansadas de los Norfolk Broads de Inglaterra, libera sustancias que destruyen las membranas celulares de sus competidores planctónicos. Como resultado, el plancton se hincha y revienta. A continuación, *Prymnesium* devora los restos. Las toxinas producidas por otra especie, *Alexandrium*, se acumulan en los moluscos a medida que estos lo filtran del agua. Las granjas de ostras, mejillones y almejas se ven obligadas a cerrar, porque las personas pueden resultar afectadas por la intoxicación paralizante por marisco si consumen bivalvos contaminados por este dinoflagelado.

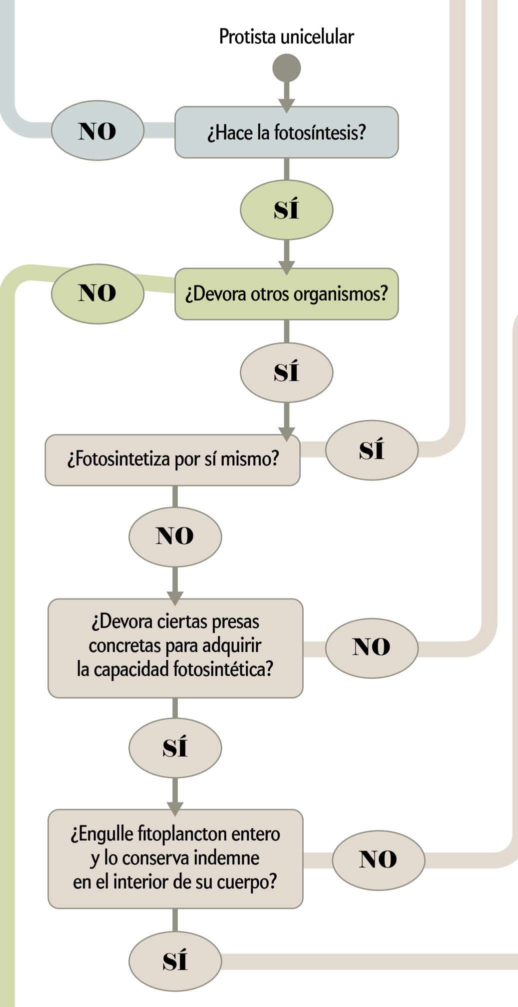
El segundo grupo carece de capacidad fotosintética y ha de apropiarse de ella. Se denominan mixótrofos no constitutivos e incluyen a *Mesodiniun* y *Dinophysis*. Es un colectivo numeroso. Se creía que recurrían a la fotosíntesis como mecanismo auxiliar de supervivencia, ante la escasez de alimento. Ahora sabemos que emplean la energía solar mucho más a menudo y que suele ser parte esencial de su modo de vida.

Los mixótrofos no constitutivos se dividen a su vez en generalistas y especialistas. Por ejemplo, los ciliados *Laboea* y *Strombidium*, ambos portadores de plástidos, son generalistas capaces de robar cloroplastos a plancton de carácter muy distinto. Los generalistas no pueden conservar su botín más allá de unos días y deben atacar nuevas presas sin cesar para reponerlos. Tienden a ser mixótrofos útiles, pues aportan nutrientes a las redes tróficas que sustentan las pesquerías y, por lo tanto, contribuyen a la seguridad alimentaria.

Por su parte, los especialistas dependen únicamente de un tipo de presa y parecen haber sido mejor dotados por la evolución para integrar los fotosistemas robados en su fisiología: los conservan durante semanas o meses. Algunos, como *Dinophysis*,

Una nueva visión del plancton

El microplancton, formado por organismos unicelulares marinos, constituye una de las principales formas de vida del planeta, pues sostiene nuestra red trófica global. Los especialistas solían pensar en términos de animal o vegetal al clasificar el papel ecológico de sus integrantes. Nuevas pruebas demuestran que en realidad el microplancton está formado mayoritariamente por mixótrofos: estos combinan una fotosíntesis similar a la vegetal con la depredación propia de los animales. En este momento los biólogos se están formulando preguntas sobre la clasificación del plancton unicelular, o protista.





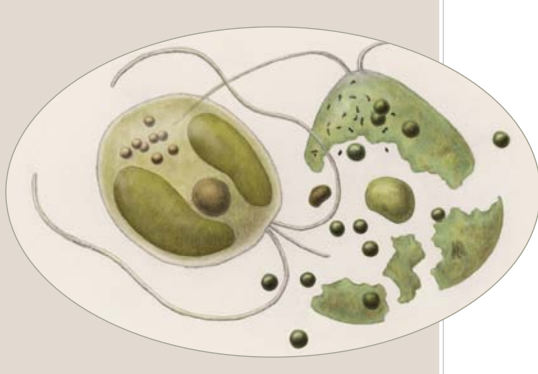
Microzooplancton

No realizan la fotosíntesis y deben ingerir otras formas de plancton para sobrevivir.

Mixótrofos

Mixótrofos constitutivos

La fisiología de estas células depredadoras les permite a la vez crear materia orgánica a partir de la luz solar y de nutrientes inorgánicos. Aquí aparece uno de ellos, *Prymnesium parvum*, atacando a *Dunaliella tertiolecta*, un alga clorofícea.



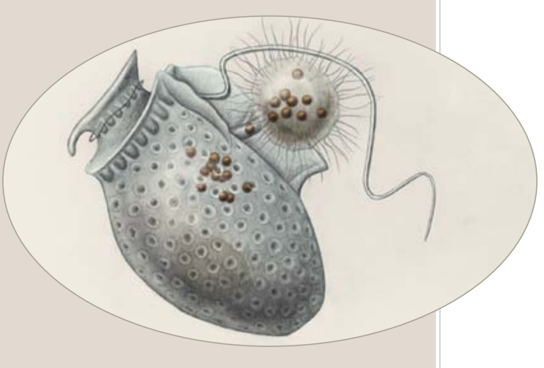
Mixótrofo no constitutivo generalista

Estos organismos se apropian de los orgánulos fotosintéticos de una gran variedad de presas. La imagen muestra a *Strombidium oculatum* robando componentes celulares de una de sus víctimas, perteneciente al género *Ulva*.



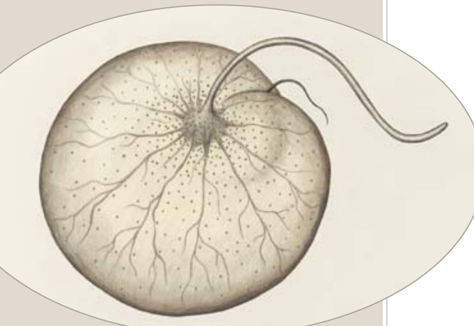
Mixótrofo no constitutivo y especialista plastidial

Estos depredadores roban partes a víctimas específicas, lo que provoca su muerte. La imagen muestra a *Dinophysis acuminata* absorbiendo orgánulos de *Mesodinium rubrum*, un ciliado.



Mixótrofo no constitutivo y especialista endosimbiótico

Los integrantes de este grupo mantienen colonias de presas fotosintéticas en el interior de su cuerpo. Aquí, un individuo de *Noctiluca scintillas* repleto de *Pedinomonas noctilucae*.



Microfitoplancton

Los organismos de este grupo se comportan como plantas y sobreviven gracias a la fotosíntesis.

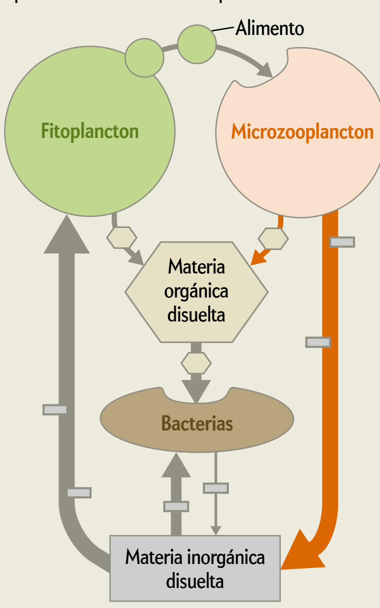
FUENTE: «DEFINING PLANKTONIC PROTIST FUNCTIONAL GROUPS ON MECHANISMS FOR ENERGY AND NUTRIENT ACQUISITION: INCORPORATION OF DIVERSE MIXOTROPHIC STRATEGIES», POR ADITEE MITRA ET AL., EN *PROTIST*, VOL. 167, N.º 2; ABRIL DE 2016; REBECCA GELERNTER (*ilustración*)

El efecto de los mixótrofos

Cuando se tiene en cuenta la existencia de los mixótrofos en el plancton marino, en lugar de considerar que solo existen especies con atributos animales o vegetales, se aprecian grandes cambios en el modo en que los nutrientes circulan por las redes tróficas y en cómo las poblaciones de microorganismos proliferan o decrecen. Estas diferencias han salido a la luz al modelizar la ecología del plancton tradicional formado por dos grandes grupos de especies y compararla con la resultante del nuevo modelo, que incluye mixótrofos capaces de robar los orgánulos fotosintéticos a otras especies de plancton. Además, se ha elaborado un tercer modelo con mixótrofos capaces de realizar la fotosíntesis por sí solos. Los resultados de los dos modelos con mixótrofos se ajustan mejor a las observaciones que el antiguo modelo tradicional.

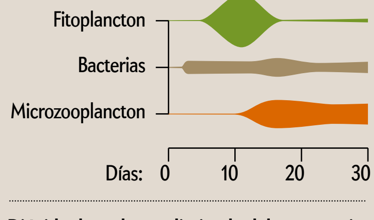
Modelo tradicional

El fitoplancton transforma la energía solar y la materia inorgánica en alimento para crecer, y el zooplancton a su vez lo devora. Las bacterias marinas descomponen entonces la materia orgánica liberada como productos de desecho para que sea reutilizada. Se trata de un ciclo ajustado, que limita el tamaño de las poblaciones.



SECUENCIA UNO-DOS CLÁSICA
En un ciclo de unos 30 días de duración, primero surge un pico de abundancia de fitoplancton (*verde*). Solo entonces puede el microzooplancton (*naranja*) comer lo suficiente como para aumentar su población. Como es lógico, tanta hambre reduce la población de fitoplancton.

Cambios en las poblaciones de plancton

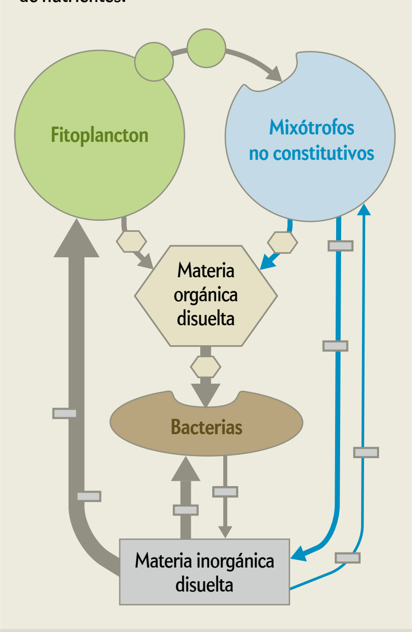


Dióxido de carbono eliminado del agua marina
(Total: 30 gramos de carbono por metro cuadrado)

Debido al fitoplancton

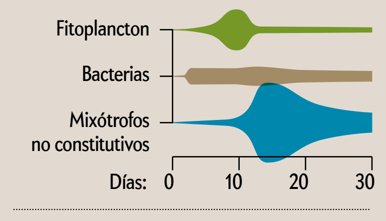
Animales fotosintéticos

Cuando los animales que también pueden fotosintetizar, es decir, los mixótrofos no constitutivos, reemplazan al zooplancton puramente animal, su naturaleza híbrida les permite retener más nutrientes. La delgada línea azul que se aleja de este grupo implica una menor pérdida de nutrientes.

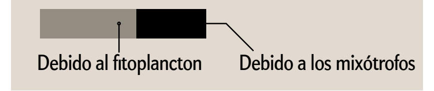


EXPLOSIÓN DEMOGRÁFICA
Las poblaciones de mixótrofos no constitutivos (*azul*) pueden ser mucho mayores que las de los depredadores ordinarios porque comen y a la vez obtienen energía de los orgánulos fotosintéticos robados. Pero el crecimiento decae una vez que se agotan las partes que roban.

Cambios en las poblaciones de plancton

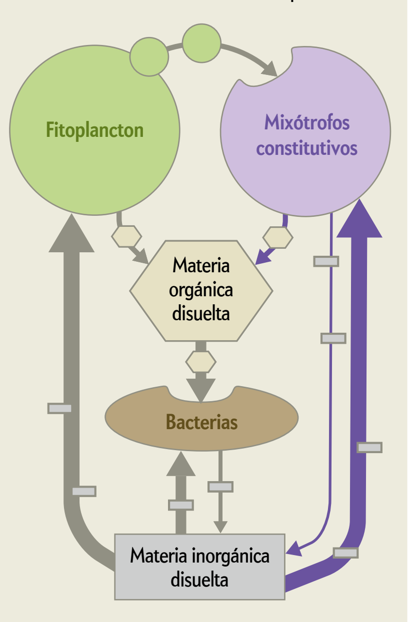


Dióxido de carbono eliminado del agua marina
(Total: 30 gramos de carbono por metro cuadrado)



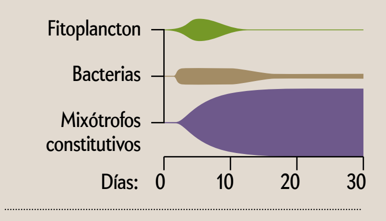
Plantas depredadoras

Si el microzooplancton tradicional es reemplazado por vegetales que también pueden cazar, los mixótrofos constitutivos, el patrón poblacional cambia. Al asimilar cantidades ingentes de nutrientes inorgánicos (*línea morada gruesa*), a la par que se comportan como depredadores, mantienen una población abundante durante mucho tiempo.

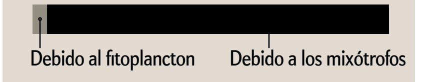


CRECIMIENTO AUTOSUFICIENTE
En virtud de su capacidad fotosintética innata, los mixótrofos constitutivos (*morado*) solo precisan para crecer un poco de fitoplancton ordinario como alimento adicional. Su población aumenta con rapidez y se mantiene elevada durante los 30 días.

Cambios en las poblaciones de plancton



Dióxido de carbono eliminado del agua marina
(Total: 65 gramos de carbono por metro cuadrado)



FUENTE: «DEFINING PLANKTONIC PROTIST FUNCTIONAL GROUPS ON MECHANISMS FOR ENERGY AND NUTRIENT ACQUISITION: INCORPORATION OF DIVERSE MIXOTROPHIC STRATEGIES», POR ADITEE MITRA ET AL. EN *PROTIST*, VOL. 167, N.º 2, ABRIL 2016; JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*)

pueden ser nocivos para el ser humano. Los bivalvos expuestos a él pueden provocar intoxicaciones mortales, y las grandes proliferaciones, como las registradas en el golfo de México, han obligado a clausurar granjas de ostras.

Algunos especialistas quedan englobados en un cuarto grupo que evidencia un comportamiento notable. No se limitan a robar partes del cuerpo, como *Mesodinium*, sino que capturan y esclavizan a colonias enteras de presas fotosintéticas. Estas viven y proliferan en el interior del hospedador, bien alimentadas y protegidas de los depredadores exteriores. Entre estos invernaderos planctónicos figuran foraminíferos y radiolarios, microorganismos ubicuos en los océanos. A lo largo de cientos de millones de años, los foraminíferos han desempeñado un papel esencial en el ciclo biológico del carbono, al captar ingentes cantidades de este elemento que acaban hundidas en el lecho marino con su muerte, pues en su descomposición solo se libera una pequeña fracción. El análisis de los antiguos depósitos estratificados de foraminíferos ha ayudado a reconstruir los cambios climáticos del pasado y a relacionarlos con las extinciones masivas. Pero no todos estos invernaderos flotantes son inocuos. La *Noctiluca* verde provoca proliferaciones tóxicas en las aguas costeras contaminadas.

REGULADORES GLOBALES

Los mixótrofos hacen gala de una gran diversidad en el medio marino: desde plantas que devoran hasta animales que fotosintetizan, y desde seres minúsculos de dos micrómetros hasta auténticos «gigantes» de un milímetro. ¿Y qué importancia tiene todo esto? Pues bien, el impacto de esta comunidad microscópica es notable.

En el centro del Atlántico, por ejemplo, existe una zona extensa donde escasean los nutrientes. Antes se pensaba que en ella el fitoplancton competía con las bacterias por los nutrientes inorgánicos disueltos, como el hierro y los fosfatos, lo que limitaba su crecimiento. Pero Mikhail Zubkov, biogeoquímico microbiano adscrito por entonces al Centro Oceanográfico Nacional de Inglaterra, y sus colaboradores descubrieron en las muestras de agua tomadas durante varias campañas oceanográficas una relativa abundancia de mixótrofos constitutivos, capaces de fotosintentizar por sí mismos.

A partir de esas observaciones, el «Equipo mixótrofo» desarrolló dos modelos de red trófica: uno basado en el modelo tradicional de competencia entre plantas y bacterias y otro que incorporaba mixótrofos. El equipo demostró que este último predecía mejor las concentraciones de nutrientes y los ciclos observados por Zubkov. En lugar de competir con el fitoplancton, las bacterias crecían aprovechando los glúcidos y otros nutrientes que se difundían desde los mixótrofos. Entonces, estos pasaban a alimentarse de las primeras, obteniendo así más hierro y fosfatos de los que podían asimilar del agua. Y el modelo solo concordaba con las observaciones si los mixótrofos eran constitutivos.

Estos microorganismos resultan especialmente importantes en los mares costeros, donde repercuten notablemente en las pesquerías. En 2017, con un modelo para el mar del Norte provisto de varios tipos de mixótrofos, descubrimos que cuando las especies pequeñas de estos microorganismos consumen bacterias, se vuelven muy numerosas y desplazan por competencia a las especies capaces de provocar floraciones algales. Estas proliferaciones espumosas no son tóxicas, pero interceptan la luz solar y limitan el ciclo de nutrientes que suministra el alimento a las larvas de los peces. Menos floraciones significan más pesca.

El dominio del fitoplancton por parte de los mixótrofos durante los meses estivales también favorece a los peces. El plancton estrictamente vegetal crece en primavera, pero luego declina, así que las vulnerables larvas de los peces no pueden depender solo de él. Por suerte, los mixótrofos siguen ahí durante el verano y constituyen un alimento de calidad que sostiene el crecimiento de los peces en esa estación.

UN FUTURO CON DOS CARAS

Los mixótrofos desempeñan un papel clave en muchos otros aspectos de las ciencias marinas, desde el cambio climático hasta las previsiones de los desembarques pesqueros, la reconstrucción del ciclo del carbono en el pasado o la predicción de las floraciones algales nocivas. Ahora el reto pasa por emplear simultáneamente las observaciones en tiempo real y nuestros modelos para determinar qué están haciendo los diferentes grupos de mixótrofos en diversas zonas del océano y en distintas estaciones del año. Esto es importante porque a medida que nuestro clima cambie, necesitaremos saber qué condiciones ambientales desatarán floraciones del tóxico *Karlodinium*, de la ecológicamente destructiva *Noctiluca* verde o de los ciliados con plástidos que son beneficiosos para las pesquerías. Acabamos de cubrir las primeras etapas de este nuevo camino, cartografiando la presencia de diversos grupos de mixótrofos en los mares del mundo. Ahora hemos de medir el tamaño de sus poblaciones en el transcurso de las estaciones, porque las variaciones de la intensidad luminosa y de la temperatura afectan drásticamente a su crecimiento y proliferación.

Algunos biólogos marinos argumentan que estas conclusiones se basan tanto en nuestros modelos como las suyas en observaciones reales; se trata de una crítica válida. Por eso necesitamos más investigadores estudiando la actividad de los mixótrofos fuera del laboratorio, en el mar abierto.

El año pasado solicité a la Unión Europea una beca para formar investigadores en este campo. En marcado contraste con mis solicitudes de hace diez años, esta recibió buenas críticas de los evaluadores y fue financiada. Nuestro «Equipo mixótrofo», cada vez mayor, podrá aportar toda la información necesaria a la próxima generación de especialistas. Juntos aspiramos a conocer todos los mecanismos con los que estas sorprendentes formas de vida controlan nuestro mundo. IyC

PARA SABER MÁS

The basis of aquatic life. Leon Augustus Hausman en *Scientific American*, diciembre 1924.

Building the «Perfect Beast»: Modelling mixotrophic plankton. Kevin J. Flynn y Aditee Mitra en *Journal of Plankton Research*, vol. 31, n.º 9, págs. 965-992, 1 de septiembre, 2009.

Defining planktonic protist functional groups on mechanisms for energy and nutrient acquisition; incorporation of diverse mixotrophic strategies. Aditee Mitra et al. en *Protist*, vol. 167, n.º 2, págs. 106-120, abril 2016.

Mixotrophy in the marine plankton. Diane K. Stoeker et al. en *Annual Review of Marine Science*, vol. 9, págs. 311-335, enero 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Plancton bacteriano de los océanos. J. M. González, C. Pedrós-Alió, J. M. Gasol, en *IyC*, diciembre de 2008.

La vida turbulenta del plancton oceánico. A. Turiel, J. Solé y M. Estrada en *IyC*, marzo de 2010.





MEDICINA

El árbol del cáncer

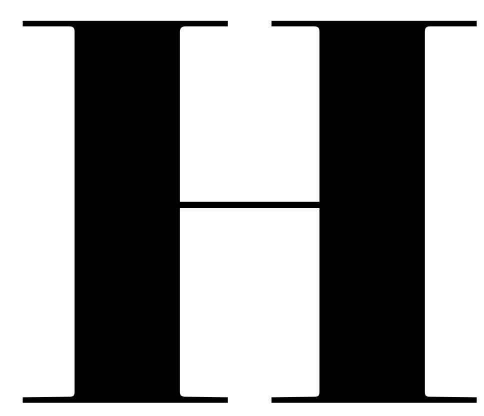
Estudios evolutivos señalan que los cambios genéticos que activan el desarrollo del cáncer surgen mucho antes de lo esperado en el tumor primario. Este hallazgo abre un nuevo y alentador enfoque para el tratamiento

Jeffrey P. Townsend

Ilustración de Marcos Chin

Jeffrey P. Townsend es profesor titular de bioestadística en la Escuela de Salud Pública de Yale y de ecología y biología evolutiva en la universidad homónima.





ACE TIEMPO QUE LOS BIÓLOGOS ESTUDIAN LOS GENES CON EL FIN DE desentrañar las ramificaciones del árbol de la vida, del que forman parte todos los seres vivos, sean tities o microbios. Una hoja de este vasto árbol ancestral, que brota entre los grandes simios, es el *Homo sapiens*. Cada individuo de la especie humana es una miríada de células que colaboran para modelar nuestro cuerpo.

En condiciones normales todas las células se atienen a un pacto, forjado hace más de 600 millones de años tras innumerables pruebas y errores en las primeras formas de vida pluricelular. En virtud del mismo, para que puedan vivir juntas deben observar unas reglas básicas: reparar su ADN cuando resulte dañado, prestar atención a las vecinas para ver si se dividen y permanecer en el tejido que les corresponde. Por lo común, las mutaciones que inducen a infringir esas limitaciones y a proliferar y diseminarse sin tregua —las señas distintivas del cáncer— se extinguen mediante la muerte controlada. Las células mutadas detectan sus propios problemas y se autodestruyen o son destruidas por el sistema inmunitario antes de que causen ningún daño.

En ocasiones, empero, las mutaciones se acumulan y el sistema de vigilancia celular no puede actuar contra ellas, con lo que aparecen tumores, que se extienden. En su interior brota un árbol evolutivo maligno.

Hoy conocemos ciertas mutaciones iniciadoras de la oncogenia, esto es, la formación del tumor inicial. Pero lo que convierte el cáncer en una enfermedad tan letal son las metástasis, células enfermas que escapan del tumor primario y se instalan en tejidos sanos donde generan nuevos tumores. Convencidos de que las metástasis se originaban por nuevas mutaciones, surgidas relativamente tarde en la evolución del foco primario, los oncólogos intentaban identificarlas para combatirlas con medicamentos específicos.

Sin embargo, hacia 2010, los avances tecnológicos brindaron métodos asequibles para secuenciar el genoma humano completo (es decir, determinar el orden de sus bases, las unidades constitutivas del ADN). Grupos de investigación de diversas instituciones comenzaron a escrutar las secuencias genéticas de los tumores y averiguaron consternados que, incluso en un mismo paciente, estos suelen acoger una variedad desconcertante de mutaciones.

En cambio, los biólogos evolutivos, entre los que me cuento, encontramos en la diversidad una valiosa fuente de información. Junto con mis colegas de la Universidad Yale y otras instituciones, decidí investigar las relaciones entre las distintas mutaciones. Secuenciamos las partes expresadas de los genomas de pacientes con cáncer —aquellos fragmentos del ADN que sabemos que controlan la síntesis de las proteínas que, por tanto, determinan las propiedades de las células. Con la información obtenida creamos árboles evolutivos de las mutaciones asociadas a la enfermedad. Las ramas ilustran cómo cambian los genes de los tumores a medida que estos crecen desde un simple puñado de células hasta convertirse en un monstruo metastatizante.

UNA MARAÑA DE RAMAS

Nuestros estudios revelaron que, en el paciente, el tumor primario se entrelaza con las metástasis mediante multitud de ramas, surgidas unas de otras en aparente azar, como las de un legendario árbol venenoso. Sorprende aún más que las primeras ramificaciones de ese árbol evolutivo broten de lo más profundo del foco inicial. Muchos años antes de que sea diagnosticado, ciertas células del tumor primario están listas para mutar en formas más malignas, cada una con sus propios mecanismos genéticos de propagación.

Si bien estos hallazgos asustan, ofrecen también nuevas esperanzas. De ellos se deduce que los investigadores del cáncer, en lugar de concentrarse en las mutaciones tardías, deberían dar preferencia al estudio de los genes que se alteran en las primeras fases del tumor primario, en la semilla de la que germina el árbol maligno. Fármacos dirigidos contra esos genes mutantes podrían ofrecer más posibilidades de curación a los pacientes.

Hace décadas que la investigación oncológica se basa en un modelo lineal. Este establece que una serie concreta de mutacio-

EN SÍNTESIS

Los árboles evolutivos de las mutaciones genéticas revelan la historia de cada tumor y los vínculos que guardan entre sí las células malignas presentes en diversos tejidos.

Las mutaciones tempranas de ciertos genes «iniciadores» parecen ser responsables de la formación del tumor primario y de las metástasis.

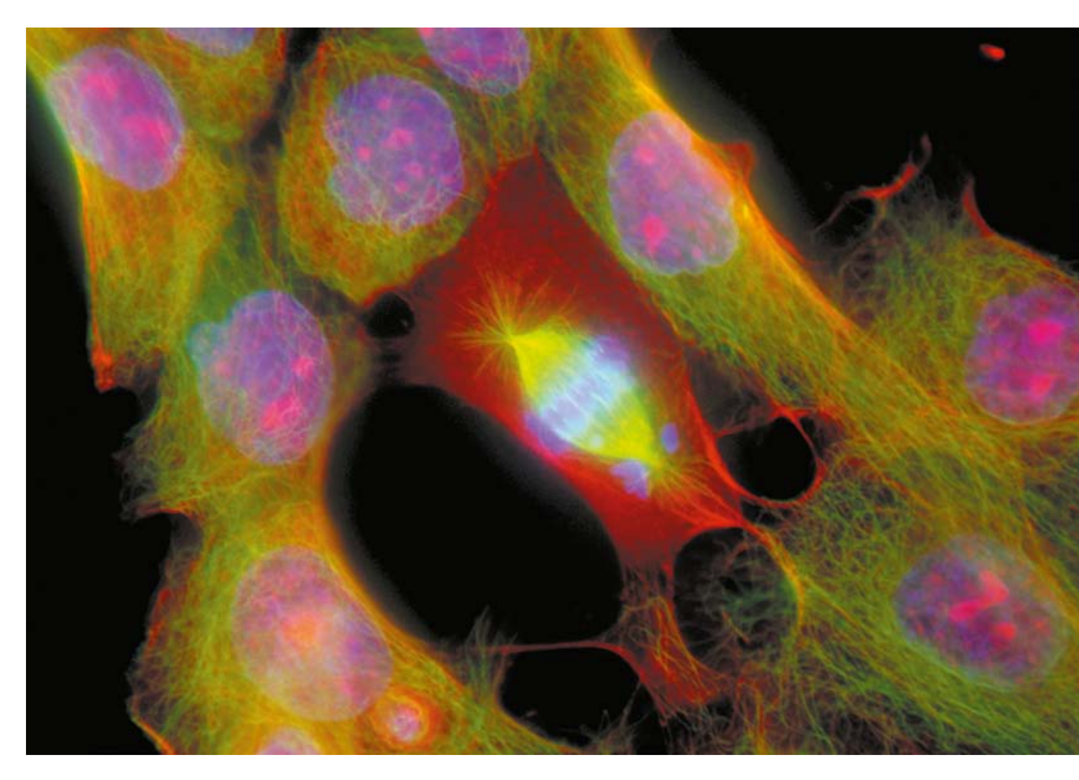
Los tratamientos antitumorales dirigidos contra los genes iniciadores que mutan pronto podrían ser los más eficaces.

En el futuro, el trazado de árboles evolutivos de las mutaciones de cada paciente podría señalar las estrategias contra los tumores resistentes.

nes conduce a la génesis del tumor. Solo después, ciertas células del foco primario sufren una o varias mutaciones ulteriores que les confieren la facultad de metastatizar. Si se trazara un árbol evolutivo de las mutaciones, semejaría una hierba: sería alto, erecto y con un solo núcleo, del que emergerían, casi en el extremo, unas pocas hojas y semillas.

Esa teoría no encaja con los conocimientos que la biología evolutiva atesora sobre la historia de las formas de vida. Los incesantes procesos de mutación y selección llevan a los organismos a divergir entre sí de modo constante, lo que genera una diversidad de linajes genéticos, en lugar de una única población homogénea. En efecto, los estudios iniciales de Marco Gerlinger, del Instituto de Investigación del Cáncer de Londres, y otros autores plantearon que, incluso en el propio tumor primario, las células de sus diferentes regiones presentan secuencias genéticas distintas.

En 2010, miembros de mi laboratorio de la Escuela de Salud Pública de Yale, junto con el anatomopatólogo David Rimm, el genetista Richard Lifton y el farmacólogo Joseph Schlessinger, todos adscritos a la escuela de medicina homónima, nos propusimos responder a tres interrogantes planteados por estas observaciones. Primero, ¿se precisan una o más mutaciones específicas para que aparezcan las metástasis, y están presentes en todos los pacientes? Segundo, ¿divergen los linajes metastásicos relativamente pronto en el curso del tumor primario, antes de que se haya acumulado el grueso de las mutaciones? Tercero, si descubrimos diversas mutaciones en los tumores primarios y en las metástasis, ¿podemos trazar árboles evolutivos para calcular cuándo tienden a surgir? La respuesta a estas incógnitas revelaría las trayectorias genéticas que conducen al nacimiento del tumor primario y de sus metástasis.



CÉLULAS de una metástasis hepática observadas mediante microscopía de luz polarizada. En el centro, una célula se halla en plena división.

JENNIFER C. WATERS, SCIENCE SOURCE

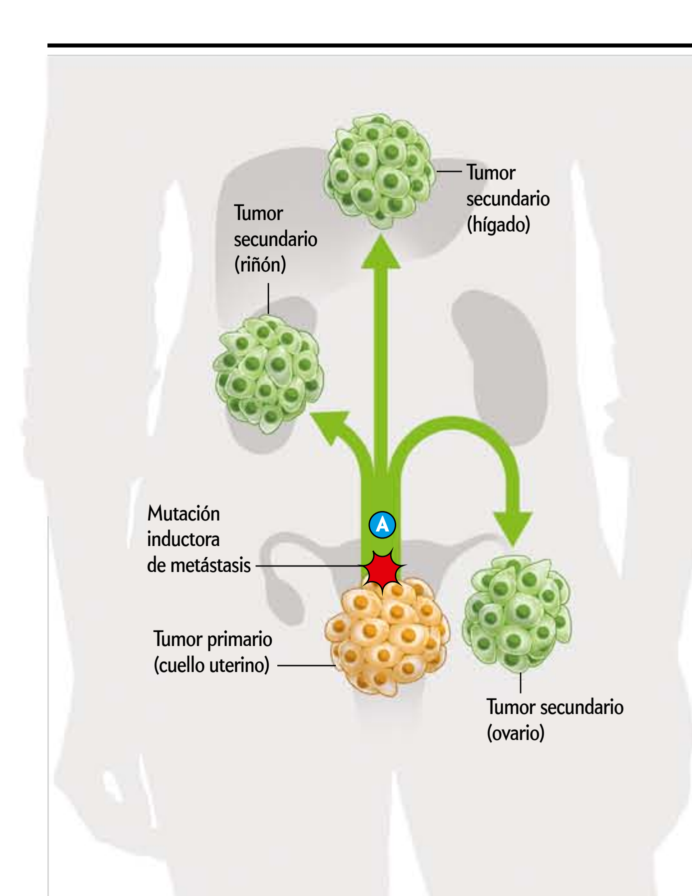
FRUTA ENVENENADA

No imaginábamos que nuestros instrumentos evolutivos fueran a ser tan potentes. Rimm obtuvo tejidos de tumores primarios y secundarios, así como de las zonas sanas circundantes de los órganos afectados, procedentes de las autopsias de 40 pacientes que habían fallecido a causa de 13 tipos de cáncer. En cada muestra, nuestro equipo secuenció todas las partes del genoma que sabemos que se expresan en algún tejido y en algún momento. Descubrimos así entre decenas y miles de mutaciones que diferenciaban la secuencia genética del linaje germinal, o normal, del paciente (el que se hereda del óvulo fecundado) de la de una o varias muestras de tejidos cancerosos.

Para comprender las relaciones entre estas muestras, Zi-Ming Zhao, entonces colaborador posdoctoral en mi laboratorio, trazó árboles evolutivos moleculares. Con este tipo de árbol se estudia nuestra relación con los chimpancés, los gorilas y los orangutanes, la relación de los simios superiores con otros mamíferos, la de los mamíferos con las aves y otras clases zoológicas, así como la de los animales en conjunto con los hongos, las plantas o las bacterias. Para elaborarlos, se comparan las divergencias entre las distintas especies en cuanto a los caracteres de los organismos (es decir, la secuencia de las bases de su ADN) y se busca la gráfica más verosímil en la que cada forma de vida de interés ocupe un lugar en las ramas del árbol.

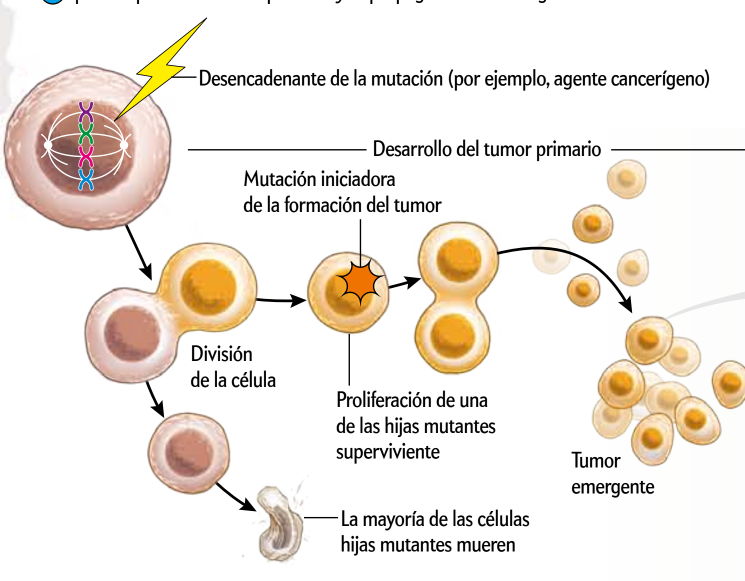
Ahora bien, aplicar esas técnicas al cáncer resulta complicado. En general, los datos que empleamos son solo secuencias del momento actual y, con esa información, intentamos averiguar todo lo posible sobre los ancestros. En cambio, en los árboles del cáncer, conocemos la secuencia del ancestro, esto es, la secuencia del linaje germinal obtenida del tejido sano. Sin modificarlo, el enfoque tradicional daría por sentado que la secuencia normal es un linaje «descendiente» adicional, con lo que obtendríamos árboles que no reflejarían la historia que nos interesa. Así, modificamos el planteamiento clásico mediante la exigencia de que la secuencia genética del tejido sano fuera el ancestro de los linajes primario y metastásico, y generamos los árboles con más probabilidades de explicar la sucesión de cambios.

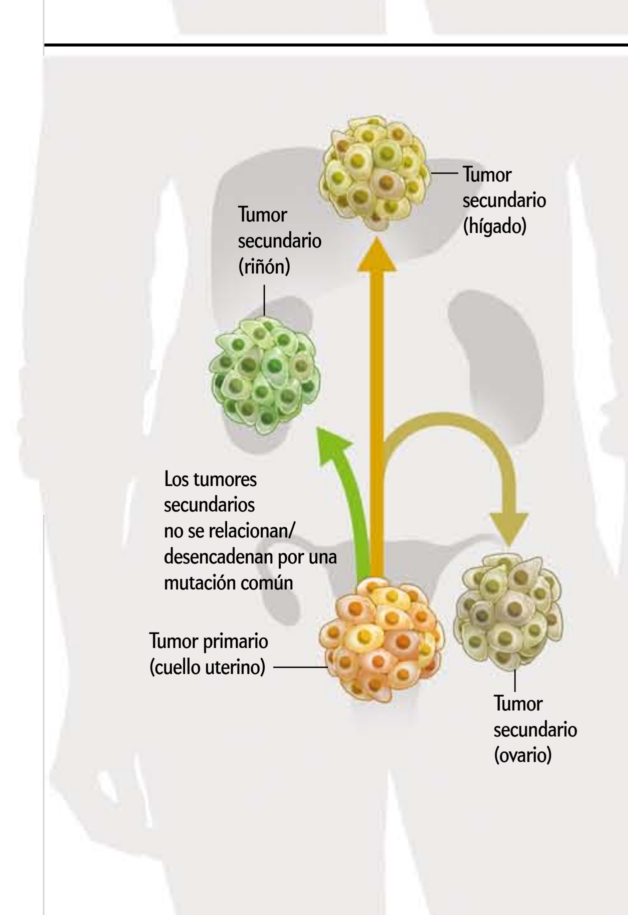
Estos árboles evolutivos reorientados revelaron algo sorprendente. Según el modelo lineal tradicional, todas las metástasis descenderían de un único linaje de células que se desprenden del tumor primario y se propagan a otras zonas. Si las metástasis se produjeran realmente de ese modo —a consecuencia de una mutación final tras una cadena de alteraciones sucesivas del ADN—, cabría esperar que la secuencia genética derivada de cada tumor secundario estuviera más estrechamente ligada con las de otros focos secundarios que con las de cualquier parte del tumor primario.

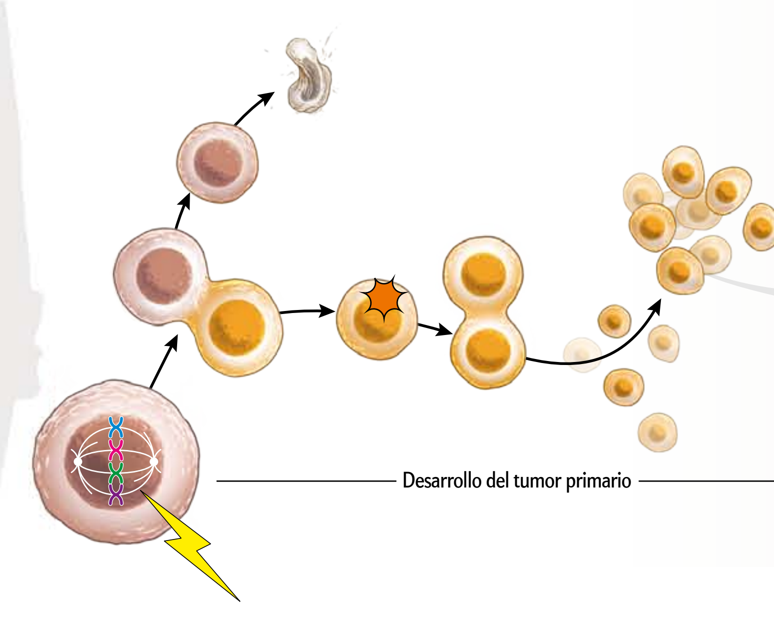


Modelo lineal

Durante décadas los investigadores del cáncer han sostenido que una serie específica de mutaciones desata la formación del tumor. Tan solo después de estos cambios, algunas células del tumor primario adquieren una o más mutaciones adicionales que les confieren la facultad de metastatizar. Por ejemplo, si se forma un tumor en el cuello uterino, una sola mutación adicional (A) podría activar la metástasis, posibilitando la diseminación de las células cancerosas al hígado, al riñón o al ovario. El modelo lineal predice que todos los tumores secundarios descenderían de un solo linaje de células (B) que escaparían del tumor primario y se propagarían a otros lugares.







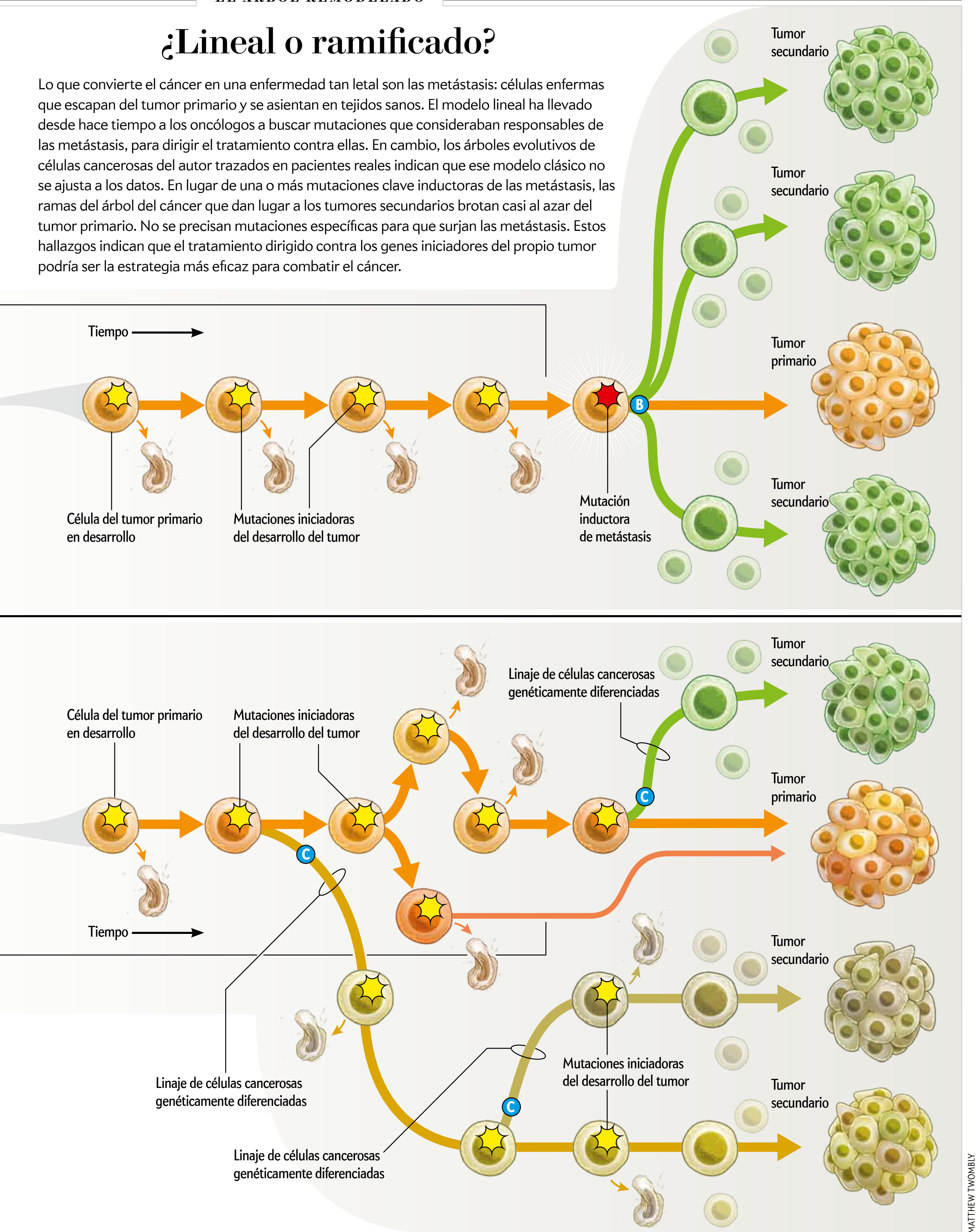
Modelo ramificado

Los árboles evolutivos de células cancerosas del autor revelaron que múltiples linajes genéticos (C) del tumor primario daban lugar a los tumores secundarios. En consecuencia, los tejidos metastásicos podrían guardar una relación más estrecha con el tumor primario que entre ellos. Estos hallazgos hacen pensar en que, en lugar de actuar contra genes que se supone que provocan metástasis, los oncólogos obtendrían mejores resultados si se centraran en los genes «iniciadores», que parecen ser responsables de la formación del tumor y de las metástasis.

EL ÁRBOL REMODELADO

¿Lineal o ramificado?

Lo que convierte el cáncer en una enfermedad tan letal son las metástasis: células enfermas que escapan del tumor primario y se asientan en tejidos sanos. El modelo lineal ha llevado desde hace tiempo a los oncólogos a buscar mutaciones que consideraban responsables de las metástasis, para dirigir el tratamiento contra ellas. En cambio, los árboles evolutivos de células cancerosas del autor trazados en pacientes reales indican que ese modelo clásico no se ajusta a los datos. En lugar de una o más mutaciones clave inductoras de las metástasis, las ramas del árbol del cáncer que dan lugar a los tumores secundarios brotan casi al azar del tumor primario. No se precisan mutaciones específicas para que surjan las metástasis. Estos hallazgos indican que el tratamiento dirigido contra los genes iniciadores del propio tumor podría ser la estrategia más eficaz para combatir el cáncer.



Pero esto no es lo que observamos. Cuando empezamos a estudiar los «árboles» tumorales, descubrimos que había pacientes cuyo tejido tumoral primario guardaba una estrecha relación con algunos tejidos metastásicos, pero no con otros. De este hallazgo se deduce que múltiples linajes genéticos del tumor primario, y no solo uno, habían metastatizado en un momento dado. De hecho, esta pauta apareció más de un tercio de las veces en nuestra serie principal de árboles que estaban bien resueltos.

ÁRBOLES TEMPORALES

Ver que el modelo lineal clásico no se ajustaba a los datos reales nos dejó asombrados. En lugar de un acontecimiento único, infrecuente, inductor de la metástasis, los datos indicaban que las alteraciones genéticas tempranas que impulsan la proliferación del tumor también son responsables de la capacidad metastásica de un linaje.

Por otro lado, en los linajes celulares que evolucionaron a metástasis, no descubrimos un único gen al que atribuir la causa. En varios pacientes, aparte de los principales genes cuyo efecto oncógeno es conocido (como el gen *KRAS*, que aparece mutado en los tumores primarios de casi todos los pacientes con cáncer de páncreas), ningún gen de los tejidos metastásicos había mutado de manera específica. De hecho, las mutaciones halladas en las ramas que conducían a los tumores secundarios eran indistinguibles de las de aquellos linajes que nunca abandonaron el tumor primario. Por tanto, resultaría más verosímil atribuir la metástasis a factores distintos de la mutación, como cambios epigenéticos (alteraciones en la forma de expresión de los genes) en una célula del tumor primario o a las características de su microentorno.

Suponemos que a medida que se acumulan los iniciadores genéticos de la oncogenia, el riesgo de metástasis se convierte en una simple cuestión de números: cuantas más sean las células malignas, más probable será que algunas migren

Las modificaciones epigenéticas en un grupo de células del tumor primario, generadas, por ejemplo, por la exposición fortuita a un agente cancerígeno, podrían aumentar su propensión a migrar. También contribuiría la ubicación de una célula concreta con respecto a otros tipos celulares. Así, ciertas células tumorales podrían diseminarse por el organismo al radicar próximas a un vaso sanguíneo o linfático, mientras que otras portadoras de idénticas mutaciones no se propagarían al no estar lo bastante cerca. Estos otros factores supuestamente influyentes en las metástasis quizá no tengan nada que ver, o muy poco, con las mutaciones que surgen más tarde en nuestros árboles evolutivos.

Una vez quedó claro que linajes divergentes del tumor primario a veces dan lugar a metástasis diferentes, nos preguntamos en qué momento de la vida del paciente se separan esos linajes metastásicos. Nuestros árboles evolutivos moleculares no responden a esa pregunta: la longitud de las ramas no corresponde al tiempo real, sino al número de mutaciones que distinguen las diferentes partes del cáncer, como los tumores primarios de las metástasis. No nos indican cuánto tiempo tarda un tumor en originar otro.

Queríamos averiguar si sería posible emplear otra técnica de la biología evolutiva —el trazado de árboles temporales— para desentrañar la historia de la progresión del cáncer en el cuerpo humano. A diferencia del árbol evolutivo molecular, la longitud de la rama del árbol temporal mide el tiempo transcurrido para que un ser evolucione a partir de otro. Estos gráficos, obtenidos mediante la comparación de los rasgos de interés (como las secuencias genéticas) y su combinación con información cronológica (como las tasas de mutación), permiten saber el momento en que acontecen los cambios fundamentales. Así, por ejemplo, se han utilizado con datos fósiles para fechar la explosión del Cámbrico, momento en que aparecieron multitud de organismos pluricelulares, hace casi 550 millones de años.

Como es natural, no contábamos con fósiles desenterrados para calibrar la evolución del cáncer a lo largo de la vida de una persona. Pero sí con algo aún mejor. En muchos casos, disponíamos de tejido primario extraído antes de la autopsia. Además, poseíamos la historia clínica de cada caso, con las fechas de nacimiento, diagnóstico, biopsia, extirpación quirúrgica del tumor y autopsia. Estas fechas sirvieron como puntos de calibración. El cáncer no se podía haber originado antes del año de nacimiento y tenía que haber existido cuando se diagnosticó el tumor primario. Y los tejidos de las biopsias y de los tumores extirpados nos ofrecían instantáneas de su evolución. Las fechas correspondientes nos permitieron calcular la tasa de mutación. También tuvimos acceso a datos publicados, recabados por radiólogos en el pasado, sobre los ritmos de división típicos de las células del tumor primario. (Los radiólogos recaban esa información con el fin de calcular la cantidad de radiación precisa para destruir el tumor con la radioterapia.)

Atila Iamarino, otro colaborador posdoctoral de mi laboratorio por aquel entonces, empleó toda esa información para convertir los árboles evolutivos moleculares en árboles temporales. Tuvimos un primer atisbo de cómo se relaciona la evolución del cáncer con el período de vida de un paciente y con la duración de su tratamiento. Pudimos calcular, por ejemplo, cuándo surgió la primera mutación genética que diferenciaba las células cancerosas del tejido sano. En los pacientes jóvenes, esta divergencia tuvo lugar en general pocos años antes del diagnóstico, mientras que, en los de mayor edad, pudo ocurrir con décadas de antelación.

RAÍCES PROFUNDAS

La primera mutación que diferenciaba genéticamente el tejido tumoral del sano apareció por lo común años —a veces, décadas— antes de que se diagnosticara el cáncer. E igual de preocupante, en nueve de cada diez sujetos, al menos un linaje metastásico ya había divergido por entonces. En siete casos, esta rama maligna se había separado del tronco más cerca en el tiempo del origen del tumor primario que de la muerte del paciente.

Estas observaciones nos parecieron sumamente relevantes. Células que luego generarán metástasis se diferencian genéticamente de otras que forman parte del tumor primario en fases tempranas de la historia evolutiva y temporal del cáncer. Tan tempranas, de hecho, que a menudo divergen incluso antes de que se diagnostique el tumor primario.

Albergábamos la esperanza de descubrir importantes mutaciones inductoras de la metástasis, que serían buenas dianas para un tratamiento farmacológico. Pero ante el escaso interés que los linajes metastásicos demostraron tener en cuanto a su genética, dejamos a un lado las ramas para dirigir nuestra atención a la evolución del tumor original. Nos preguntábamos si el tronco del árbol evolutivo desempeña un cometido especial en la génesis del cáncer. Para responder a este interrogante, investigamos si las mutaciones de este tronco surgían en ADN que altera la función celular de genes cuya intervención en el cáncer es conocida.

Así era, en efecto. Por ejemplo, *p53,* un conocido gen oncosupresor que inhibe la proliferación celular, aparecía mutado en muchos pacientes en las fases iniciales de la evolución de diversos tumores. Lo mismo ocurrió con el protoncogén *KRAS.* (Un protoncogén es un gen que se transforma en oncogén si muta, momento en que desata la división sin freno de la célula afectada.) Casi todos los pacientes con cáncer de páncreas, por citar un caso, presentaban una mutación temprana en el sitio 12 del gen *KRAS.*

La frecuente presencia de estos genes clave en las raíces de los linajes cancerosos implica su participación en la génesis de los tumores y de sus metástasis. Suponemos que a medida que se acumulan los iniciadores genéticos de la oncogenia, el riesgo de metástasis se convierte en una simple cuestión de números: cuantas más sean las células malignas, más probable será que se hallen en un lugar, o que adopten un estado epigenético, que facilite su diseminación.

Se precisan estudios que aclaren la influencia de tales genes clave en el riesgo de oncogenia y de metástasis, pero no hay duda de que los oncoiniciadores tempranos merecen especial atención. Fármacos dirigidos contra ellos quizá serían decisivos para el tratamiento del cáncer, tanto en las primeras etapas del foco primario como en los tumores avanzados.

REBROTE

Ensayos clínicos recientes han demostrado que es posible movilizar el sistema inmunitario del organismo para aniquilar las células tumorales. Ahora bien, los tumores parecen adquirir resistencia tanto a los medicamentos dirigidos como a la inmunoterapia. ¿Nace la resistencia de mutaciones específicas, igual que el tumor primario? ¿O es un síntoma del microentorno y de otros factores, como parece ser la metástasis? Aún no lo sabemos, pero los árboles evolutivos pueden arrojar luz sobre esta cuestión.

Nuestros estudios con árboles temporales han revelado que también se hallaban mutados ciertos genes menos conocidos pero que se sospecha que son asimismo oncoiniciadores, si bien esas alteraciones tendieron a surgir en fases posteriores de la enfermedad. Es decir, no radicaban en el tronco sino en las ramas del árbol del cáncer, por lo que, en general, las mutaciones de estos genes estaban presentes solo en algunos de los tumores de los pacientes, pero no en otros. En consecuencia, los tratamientos que se dirigieran contra ellas, como preferirían algunos oncólogos, podrían destruir la rama mutante, pero el resto del árbol continuaría brotando y poniendo en peligro la vida del enfermo. Los médicos que emplearan tales fármacos harían bien en complementarlos con tratamientos diseñados para destruir también otros tipos de células cancerosas.

Por otro lado, si un medicamento tiene como diana una mutación temprana presente en todo el tejido canceroso, podrían surgir resistencias motivadas por la proliferación de células portadoras de nuevas mutaciones específicas. La anatomopatóloga Katerina Politi, de la Escuela de Medicina de Yale, y sus colaboradores han identificado alteraciones del gen *EGFR* (otro importante oncoiniciador cuando muta, sobre todo del cáncer de pulmón) que desempeñan un papel destacado en la resistencia. Para entender por qué y cómo evoluciona la resistencia a lo largo del tratamiento del paciente, nuestro grupo de investigación ha empezado a aplicar técnicas evolutivas. Generamos árboles de cáncer de los pacientes y buscamos en las ramas mutaciones que propicien un tejido resistente al tratamiento, como es un tumor recidivante. Nuestros estudios preliminares, muy prometedores, señalan que la resistencia parece ser fruto de alteraciones genéticas resultantes del tipo de tratamiento que recibe el paciente.

El número de medicamentos desarrollados contra las mutaciones específicas aumenta cada año, al igual que la posibilidad de prescribir combinaciones complejas de quimioterapia ordinaria, radioterapia e inmunoterapia. Los oncólogos ya no piensan que un tipo de cáncer sea una enfermedad homogénea, sino que cada caso tiene su propia entidad. El estudio genómico de cada paciente tendrá en el futuro una repercusión enorme sobre el tratamiento del cáncer. Para emplear sabiamente esas nuevas herramientas, los oncólogos tendrán que actuar como verdaderos biólogos evolutivos, con la misión de examinar la variabilidad genética presente en los tejidos malignos de cada paciente e idear una estrategia que destruya el árbol del cáncer de la raíz hasta la copa. IyC

PARA SABER MÁS

Inferring the origin of metastases from cancer phylogenies. Woo Suk Hong et al. en *Cancer Research*, vol. 75, n.º 19, págs. 4021-4025, octubre de 2015.

Early and multiple origins of metastatic lineages within primary tumors. Zi-Ming Zhao et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 113, n.º 8, págs. 2140-2145, 23 de febrero de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Así se propaga el cáncer. Erkki Ruoslahti en *IyC*, noviembre de 1996.

El círculo de la vida. Mark Fischetti en *IyC*, diciembre de 2016.

Las ecuaciones del cáncer. Guillermo Lorenzo, Guillermo Vilanova y Héctor Gómez en *IyC*, abril de 2017.



EL RADIOTELESCOPIO PARKES, en Australia, fue el primero en detectar una misteriosa y breve ráfaga de ondas de radio procedente del universo lejano.

El misterio de las explosiones rápidas de radio

Los astrónomos se afanan en descubrir qué es lo que causa unos potentes estallidos de radiación en el cosmos distante. ¿Hay nueva física detrás?

Duncan Lorimer y Maura McLaughlin

UN DÍA DE PRINCIPIOS DE 2007, DAVID NARKEVIC, UN ALUMNO DE GRADO, VINO A DARNOS UNA noticia. Narkevic era estudiante de física en la Universidad de Virginia Occidental, donde nosotros acabábamos de comenzar nuestro primer año como profesores. Le habíamos encomendado la tarea de examinar datos de archivo sobre las Nubes de Magallanes, dos galaxias satélite de la Vía Láctea situadas a unos 200.000 años luz de nuestro planeta. Narkevic era de carácter comedido, y ese día no fue una excepción: «He descubierto algo que parece bastante interesante», dijo con tranquilidad mientras nos mostraba una gráfica. En ella, la señal era más de cien veces más intensa que el ruido debido a la electrónica del telescopio. En un principio nos pareció que había encontrado justo lo que estábamos buscando: un púlsar, un tipo de estrella muy pequeña, compacta y brillante.

ROBERT B. GOODMAN, GETTY IMAGES

EN SÍNTESIS

En 2007, una extraña ráfaga de ondas de radio procedente del universo lejano desconcertó a los astrónomos.

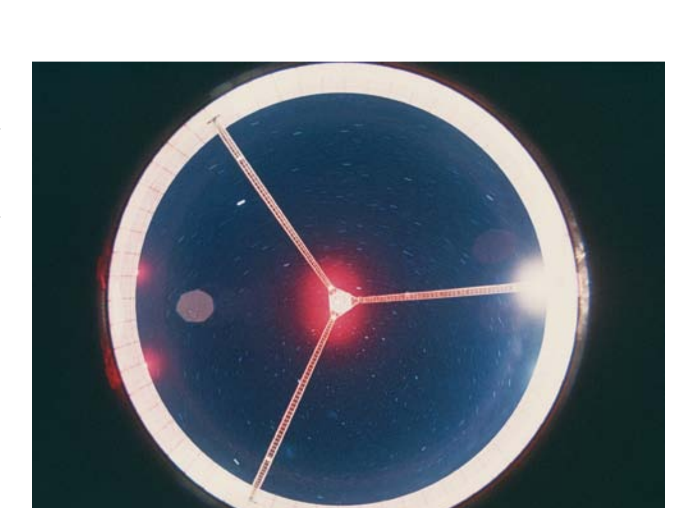
Tras varias dudas iniciales sobre su veracidad, en los últimos años se han detectado otras explosiones similares.

Los astrónomos saben que corresponden a estallidos muy energéticos ocurridos en galaxias distantes, pero por el momento ignoran su origen.

Las hipótesis incluyen estrellas compactas, supernovas e incluso fenómenos exóticos, como cuerdas cósmicas.


Duncan Lorimer es profesor de física y astronomía en el Centro de Ondas Gravitacionales y Cosmología de la Universidad de Virginia Occidental. Sus investigaciones se centran en los púlsares y las explosiones rápidas de radio.

Maura McLaughlin es astrónoma en la Universidad de Virginia Occidental, donde investiga las estrellas de neutrones. Actualmente preside el Observatorio Norteamericano de Ondas Gravitacionales en Nanohercios, que pretende usar las observaciones de púlsares para detectar ondas gravitacionales.



AL MIRAR AL CIELO desde la antena del observatorio Parkes, puede verse un cielo lleno de estrellas. Tras el descubrimiento de la «explosión de Lorimer», en 2007, el telescopio ha detectado otras ráfagas rápidas de radio.

ROGER RESSMEYER, GETTY IMAGES

Estos astros emiten luz en forma de haces que barren el cielo a medida que la estrella rota, por lo que esta parece encenderse y apagarse, al igual que un faro. Por entonces se conocían unos 2000 púlsares, y nosotros estábamos intentando encontrar algunos lejanos y especialmente brillantes. La búsqueda se basaba en un programa informático que uno de nosotros (McLaughlin) y su exdirector de tesis habían desarrollado para identificar pulsos en observaciones de radio. El código debía tener en cuenta la dispersión de los pulsos: a medida que las ondas de radio viajan por el espacio, los electrones libres del medio interestelar separan las ondas de modo parecido a como un prisma descompone la luz, de manera que las de mayor frecuencia viajan más rápido y llegan antes al telescopio que las de frecuencias más bajas. Cuanto más lejos esté la fuente de la Tierra, más electrones encontrarán las ondas de radio en su camino, lo que provocará un mayor retraso entre las ondas de frecuencias altas y bajas. Dado que no sabíamos cuán lejos podían encontrarse los nuevos púlsares que estábamos buscando, el programa examinaba los datos en busca de señales compatibles con muchos posibles retrasos; es decir, con distintas medidas de dispersión. Eso nos aseguraba que seríamos capaces de detectar púlsares en un amplio abanico de distancias.

Cuando hizo su descubrimiento, Narkevic estaba analizando observaciones efectuadas cinco años atrás por el radiotelescopio Parkes, en Australia. Este instrumento es capaz de explorar con rapidez grandes áreas del cielo gracias a que puede observar de manera simultánea 13 posiciones, denominadas en jerga «haces». Narkevic había inspeccionado visualmente las señales detectadas por el programa con el objetivo de extraer el 1 por ciento de ellas que no se debían al ruido ni a interferencias humanas.

La señal en la que había reparado era desconcertante. No solo por su gran brillo, sino también porque provenía de una región del cielo situada unos pocos grados al sur de la Pequeña Nube de Magallanes, por lo que no parecía corresponder a un púlsar de la galaxia enana. Pero lo más sorprendente era que la señal mostraba una medida de dispersión muy elevada: mucho mayor de lo que cabía esperar para un objeto de la Vía Láctea, e incluso un 50 por ciento más grande de la que mostraría un astro en la Pequeña Nube de Magallanes. La fuente parecía encontrarse a unos 3000 millones de años luz, mucho más allá de nuestro Grupo Local de galaxias.

Para haber llegado desde tan lejos, la ráfaga tuvo que emprender su camino antes de que los dinosaurios poblaran la Tierra. La velocidad finita de la luz y la corta duración de la señal indicaban que no podía proceder de un objeto de más de 10 milisegundos luz de ancho; es decir, unos 3000 kilómetros, mucho menos que los 1,4 millones de kilómetros que mide el Sol de diámetro. Aunque un púlsar sí resultaba compatible con esas dimensiones, la cantidad de energía radiada era más elevada que la que libera el Sol en todo un mes y más de 1000 millones de veces mayor que la de los pulsos de los púlsares más brillantes.

¿Qué tipo de objeto nos brindaba semejante espectáculo? Nuestra máxima prioridad fue establecer si la señal podía deberse a interferencias humanas. A diferencia de los destellos de los púlsares, este no parecía repetirse: solo encontramos uno en las aproximadamente dos horas que había durado la observación. Sin embargo, los tiempos de llegada de las diversas frecuencias seguían el patrón esperado para la dispersión interestelar, algo muy poco probable si se hubiese tratado de una interferencia. Una prueba adicional de su origen astrofísico era que la ráfaga parecía provenir de un único punto del cielo: mostró su máximo brillo en uno de los 13 haces receptores del telescopio Parkes, mientras que otros 3 solo la detectaron débilmente. Eso es justo lo que esperamos de una señal celeste, ya que una interferencia cercana de origen humano habría quedado registrada en los 13 haces del telescopio.

Parecía que Narkevic había dado con algo totalmente nuevo: un tipo de señal cósmica que ocuparía un lugar cada vez más destacado en nuestras investigaciones y que acabaría desconcertando a toda la comunidad astronómica. Y tal vez aquel extraño fenómeno no fuese el único. A partir de la duración y el campo de visión de las observaciones del telescopio Parkes, calculamos que cada día podrían estar estallando en el cielo varios centenares de ráfagas de radio similares sin que las detectáramos. En el mismo 2007 publicamos un artículo en el que postulábamos que aquel evento correspondía al prototipo de una nueva población de fuentes de radio de origen desconocido. Teorizamos que, si pudiéramos identificarlas y comprenderlas, no solo aprenderíamos acerca de un nuevo fenómeno astrofísico; también podríamos estimar sus distancias a través de las medidas de dispersión y usarlas para algo tan ambicioso como trazar un mapa de la estructura a gran escala del universo. Sin embargo, primero teníamos que demostrar que la explosión era real: una empresa que daría muchas vueltas y que casi acaba en una retirada.

¿REALIDAD O FICCIÓN?

En un principio, otros investigadores se mostraron intrigados por nuestro descubrimiento, al que enseguida bautizaron como «explosión de Lorimer», por lo que comenzaron a proponer ex-

plicaciones sobre su origen y a buscar otros eventos parecidos.

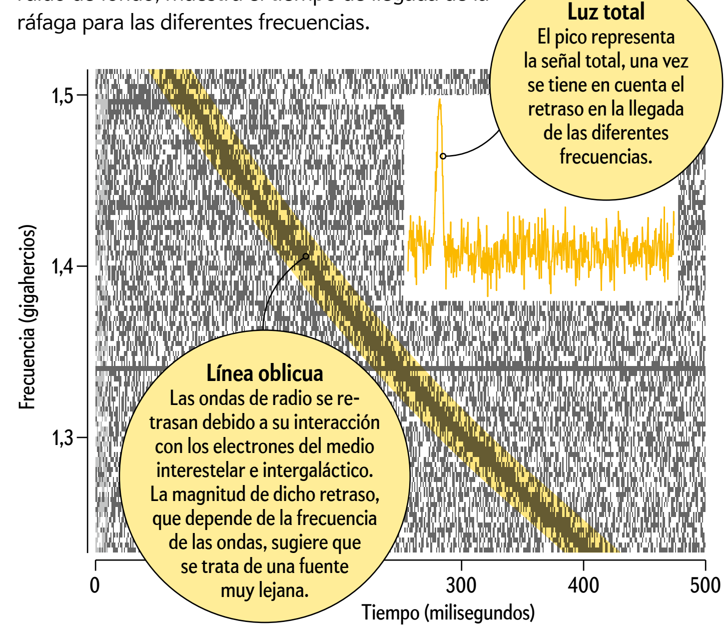
Poco después, Matthew Bailes, investigador de la Universidad Swinburne de Melbourne y uno de los autores del artículo donde habíamos anunciado el hallazgo, empleó el telescopio Parkes para explorar durante 90 horas el área del cielo donde se produjo la explosión. Sin embargo, no halló pruebas de otros destellos. Aquel estudio se estaba llevando a cabo seis años después de que se hiciese la observación de archivo que reveló la ráfaga original, por lo que no podía descartarse que antes y después de ella se hubieran producido múltiples explosiones con intervalos de horas o incluso de años.

Bailes y quien entonces era su estudiante de doctorado, Sarah Burke-Spolaor, efectuaron otra búsqueda usando más datos de archivo de Parkes, pero en un área diferente del cielo. En un artículo publicado en 2010 anunciaron 16 eventos que compartían numerosas características con la explosión de Lorimer. Algunos de ellos presentaban una medida de dispersión casi idéntica, así como una duración y una forma del pulso similares. Sin embargo, había una diferencia notable: todas esas ráfagas habían aparecido en los 13 haces del receptor de Parkes, lo que sugería que no se trataba de una fuente astrofísica, sino de algún fenómeno generado en tierra o en la atmósfera, como un rayo. Para dejar constancia de la naturaleza engañosa de aquellas fuentes, Burke-Spolaor y Bailes las denominaron «peritios», en honor al mítico ciervo alado que proyecta una sombra humana.

OBSERVACIONES

La explosión original

Esta sorprendente señal, descubierta en 2007 y bautizada como «explosión de Lorimer», parece corresponder a un tipo desconocido de estallido cósmico. El inserto muestra el brillo de toda la luz de radio a lo largo del tiempo: la señal apareció y desapareció en apenas un instante. La línea oblicua de la gráfica principal, representada sobre el ruido de fondo, muestra el tiempo de llegada de la ráfaga para las diferentes frecuencias.



FUENTE: DUNCAN LORIMER; AMANDA MONTAÑEZ (*gráfico*)

Los peritios hicieron que muchos se mostraran escépticos sobre la explosión de Lorimer. Y, dado que otros sondeos habían fracasado en su intento de captar nuevas ráfagas, la mayoría comenzó a sospechar que el fenómeno identificado en 2007 correspondía, en el fondo, a otro peritio. El número de artículos que especulaban sobre la naturaleza de la señal comenzó a disminuir. En una conferencia de 2011 incluso se celebró una votación a mano alzada para ver qué parte de la audiencia pensaba que la explosión de Lorimer era real. Uno de nosotros (Lorimer), que estaba sentado en la primera fila, ni siquiera se atrevió a mirar atrás para comprobar el resultado.

Cuatro años después de la detección original, McLaughlin, acompañada por un investigador posdoctoral y un estudiante de grado, buscó más ráfagas en los datos de un gran estudio sobre radiopúlsares. Tras no encontrar ningún otro evento similar, incluso ella comenzó a dudar. De hecho, escribió junto con sus colaboradores un artículo que afirmaba que, después de todo, no era probable que la explosión original fuera de naturaleza astrofísica, una conclusión que hoy resulta embarazosa.

Pero entonces la investigación se revitalizó de manera espectacular. El primer evento prometedor llegó en 2012, cuando Evan Keane, ahora en la Organización de la Red del Kilómetro Cuadrado (SKAO, una gran batería de radiotelescopios), con sede en Manchester, identificó en los datos de archivo de Parkes otra ráfaga que mostraba una gran dispersión. Mientras tanto, Bailes había liderado una campaña para modernizar Parkes con instrumentos digitales de última generación, lo que aumentaría su sensibilidad para detectar ráfagas muy dispersas. Aquellos esfuerzos acabaron rindiendo sus frutos: en 2013, un nuevo estudio de Parkes identificó cuatro explosiones con una amplia variedad de medidas de dispersión. En el artículo donde se presentaron los primeros resultados del trabajo, dirigido por el estudiante de doctorado de la Universidad de Mánchester Dan Thornton, los autores bautizaron aquellos eventos como «explosiones rápidas de radio» (FRB, por sus siglas en inglés). A diferencia de lo que había ocurrido con los peritios, aquellas cuatro ráfagas solo fueron detectadas en uno de los haces receptores del telescopio, lo que apuntaba a un origen astronómico y no a interferencias generadas en nuestro planeta.

Aquellos hallazgos dejaron cada vez más clara la naturaleza astrofísica de las FRB. Fue entonces cuando, en un giro humorístico de la historia, un artículo publicado en 2015 por Emily Petroff, a la sazón en Swinburne, y otros investigadores demostró que los peritios de Parkes habían ocurrido principalmente a la hora de comer, cuando los impacientes astrónomos abrían el microondas sin esperar a que se apagase. Fue un gran alivio comprobar que ni la explosión de Lorimer ni las otras FRB habían coincidido en el tiempo con los hábitos culinarios de científicos hambrientos.

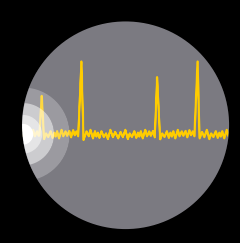
DESTELLOS RECURRENTES

Muy pronto, gracias a las búsquedas llevadas a cabo con diferentes telescopios y por una comunidad cada vez más numerosa, comenzaron a aflorar más explosiones de radio. El instrumento Green Bank, en Virginia Occidental, registró una en un intervalo de frecuencias de radio distinto al de la explosión de Lorimer, lo que proporcionó más pruebas de que la ráfaga era real y no el resultado de alguna peculiaridad de los receptores que exploraban la banda de frecuencias original.

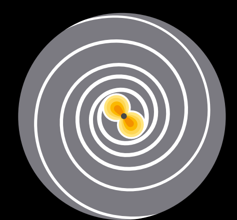
HIPÓTESIS

Posibles causas

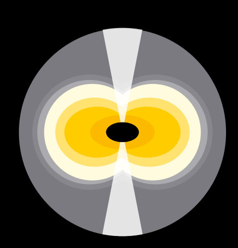
Los astrónomos barajan varias hipótesis sobre el origen de las explosiones rápidas de radio (FRB). Las posibilidades abarcan desde versiones extremas de fenómenos ya conocidos, como las supernovas, hasta opciones teóricas exóticas, como las cuerdas cósmicas. Una de las FRB detectadas hasta ahora se repite, por lo que ha de estar causada por una fuente persistente, pero otras podrían deberse a eventos aislados.



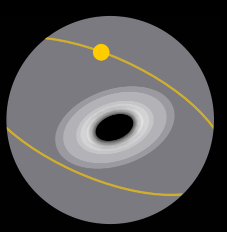
Estrellas de neutrones
Las estrellas de neutrones, densos remanentes de estrellas muertas, emiten luz en haces que barren el cielo mientras el astro rota, por lo que el objeto parece encenderse y apagarse. Una estrella de neutrones extremadamente energética podría causar una explosión rápida de radio.



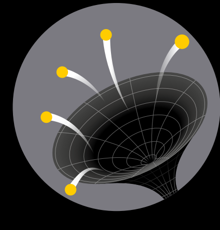
Colisiones de estrellas de neutrones
Si dos estrellas de neutrones chocan entre sí, el fenómeno podría liberar grandes cantidades de radiación y dar lugar a un agujero negro o a una estrella de neutrones de gran tamaño.



Supernovas
Cuando las estrellas de gran masa mueren, estallan en forma de supernova. Las FRB podrían estar causadas por supernovas especialmente energéticas.



Magnetares
Los magnetares, estrellas de neutrones muy magnetizadas, emiten radiación debido a su energía magnética. Si uno de ellos girase alrededor de un agujero negro que esté engullendo materia (un «núcleo galáctico activo»), la interacción entre ambos podría generar una FRB.



Agujeros negros primordiales
Varios modelos teóricos contemplan la existencia de agujeros negros «primordiales», creados poco después de la gran explosión. Si uno de ellos se evaporase (un proceso predicho por Stephen Hawking en los años setenta), podría generar un estallido de ondas de radio.



Cuerdas cósmicas
Estos defectos del espaciotiempo constituyen otro posible resultado exótico de la gran explosión. Si existieran, podrían haber generado destellos de radio al interaccionar con el plasma del universo primitivo.

Pero todo se complicó en 2016, cuando un equipo dirigido por Laura Spitler, del Instituto Max Planck de Radioastronomía de Bonn, anunció que había detectado destellos repetidos asociados a una de las explosiones, observada originalmente en datos tomados en 2012 desde el Observatorio de Arecibo, en Puerto Rico. Hasta entonces, los astrónomos habían llegado a la conclusión de que las ráfagas correspondían a eventos puntuales; es decir, que ocurrían una sola vez. Sin embargo, unos tres años después del estallido inicial, conocido como FRB 121102, Spitler y sus colaboradores identificaron otras diez explosiones en la misma zona del cielo. Sus tiempos de llegada no parecían ser regulares, y tanto la duración de los pulsos como otras características exhibían variaciones.

A raíz de este descubrimiento se organizaron varias campañas con radiotelescopios de todo el mundo. Una de ellas usó el conjunto VLA de Nuevo México, compuesto por 27 antenas, para buscar de manera sistemática en la región del cielo de FRB 121102. Aquel sondeo ofrecía unas posibilidades únicas para determinar la posición celeste de las ráfagas de radio con muy buena precisión, superior en varios órdenes de magnitud a la proporcionada por una sola antena. Después de unos seis meses de observaciones, el equipo, liderado por Shami Chatterjee, de Cornell, localizó una explosión. Poco después fue posible ubicarla aún mejor gracias a la técnica de interferometría de base muy larga, que combina las señales de telescopios de todo el mundo para conformar un telescopio virtual mucho mayor y de excelente resolución. El hallazgo, logrado por el equipo de Benito Marcote, del Instituto JIVE, en los Países Bajos, localizó repetidas explosiones asociadas a FRB 121102 con una precisión inferior a un segundo de arco.

Aquella fue la primera vez que se logró medir la posición celeste de una FRB con tanta exactitud. Gracias a ello, fue posible identificar la galaxia en la que se produjo. Un equipo dirigido por Shriharsh Tendulkar, de la Universidad McGill, determinó que FRB 121102 se había originado en una galaxia enana con una masa 20.000 veces menor que la de la Vía Láctea y mucho más distante que el púlsar más lejano que conocemos. Estos hallazgos dejaron claro que las FRB constituyen eventos de enorme potencia y extremadamente remotos.

EN BUSCA DE LAS FUENTES

Hoy ya sabemos que las FRB son fenómenos cósmicos reales. Sin embargo, aún queda un largo camino por recorrer hasta descubrir su causa. Una pregunta importante es si estas ráfagas se originan a partir de eventos aislados, como las supernovas, o si proceden de objetos duraderos, como los púlsares, que emiten destellos de forma periódica. El caso recurrente de FRB 121102 parece apuntar a la segunda posibilidad. Aunque hasta ahora se trata de la única FRB para la que se han detectado múltiples estallidos, es posible que todas ellas se repitan, y que cada una de las ráfagas aisladas que hemos observado no sea sino la más brillante en cierta distribución de energías.

Así pues, si nos ceñimos a fuentes cósmicas persistentes, muchos astrónomos se decantan por explicaciones relacionadas con objetos compactos, como los púlsares. Estos astros se forman cuando una gran estrella muere en forma de supernova y una gran parte de su masa colapsa sobre sí misma. La densidad del objeto resultante es tal que ni siquiera los átomos pueden resistir la presión, de modo que los protones y los electrones se combinan para formar neutrones. El producto final es una estrella del tamaño de una ciudad y compuesta casi por completo por neutrones, la cual rota a gran velocidad y emite haces de radia-

NIGEL HAWTIN

ción. Hablamos de «púlsares» cuando esos haces apuntan hacia la Tierra, de modo que, debido a la rotación del objeto, vemos un brillo intermitente. Las ráfagas recurrentes observadas en FRB 121102 presentan propiedades que, en general, se muestran compatibles con las de pulsos muy energéticos emitidos por una estrella de neutrones joven. Así que, a fin de cuentas, las FRB podrían estar causadas por púlsares, aunque estos serían de un tipo poco común y muy potente.

Una idea relacionada es que las FRB procedan de magnetares: estrellas de neutrones muy magnetizadas, que giran despacio y en las que la emisión no guarda relación con la rotación, sino con la energía magnética. Un aspecto enigmático de las observaciones de FRB 121102 realizadas por los telescopios VLA es la presencia de una emisión de radio brillante y persistente, distinta de la que caracteriza a las FRB, en la galaxia anfitriona. Se ha especulado que esa radiación podría corresponder a un núcleo galáctico activo (un agujero negro supermasivo en proceso de devorar estrellas y gas) y que las FRB se generarían debido a la interacción de este con el magnetar.

Una variante de esta idea propone que las explosiones recurrentes provienen de un magnetar sumergido en el remanente de una supernova superluminosa (unas diez veces más energética que una supernova típica) que explotó hace algunos decenios. Se ha observado que la galaxia anfitriona de FRB 121102 se asemeja a aquellas en las que se producen estallidos de rayos gamma, un fenómeno que creemos vinculado a magnetares muy jóvenes formados en supernovas superluminosas. Hace muy poco, el mismo equipo que hizo esta observación midió el campo magnético a lo largo de la línea de visión en la dirección de FRB 121102. Sus datos muestran que, con independencia de su naturaleza, la fuente de FRB 121102 debe encontrarse en una región con una magnetización relativamente elevada, como ocurre en un remanente denso de supernova o alrededor de un agujero negro supermasivo en el centro de una galaxia.

Por el momento, sin embargo, tampoco podemos descartar que las FRB correspondan a eventos puntuales. Tal vez algunas explosiones se repitan y otras no, lo que implicaría varios tipos de fuentes. De hecho, un estudio dirigido por Divya Palaniswamy, por entonces en la Universidad de Nevada en Las Vegas, demostró que, si todas las FRB se repitieran al ritmo observado en FRB 121102, tendríamos que haber visto más de una ráfaga también en otros casos. Por tanto, quizá quepa considerar que algunas FRB se originan en sucesos catastróficos aislados. Esta posibilidad nos deja con varios candidatos.

El primer lugar de la lista lo ocupan las colisiones de estrellas de neutrones. Un cataclismo semejante probablemente provoque una potente explosión al producirse el contacto entre los astros, en el momento en que ambos se unen para formar un agujero negro. Por otro lado, una segunda posibilidad sería la explosión de una supernova especialmente energética.

Algunos teóricos han sugerido opciones más exóticas. Una de ellas postula que las FRB podrían estar causadas por cuerdas cósmicas: hipotéticos defectos topológicos del espaciotiempo formados en el universo primitivo. Tales deformaciones habrían viajado a la velocidad de la luz a través del cosmos y habrían generado destellos al interaccionar con el plasma. Aunque las observaciones actuales no descartan la posibilidad de que tales destellos sean las FRB, la idea no deja de resultar muy especulativa. Otros científicos han propuesto como causa los agujeros negros primordiales: pequeños agujeros negros creados durante el nacimiento del universo y que nadie habría detectado hasta ahora. Si uno de ellos se «evaporase» (un fenómeno predicho en los años setenta por Stephen Hawking), la radiación liberada podría corresponder a la señal observada en una FRB.

CARTOGRAFIAR EL CIELO

Tras un decenio de trabajo, la ciencia de las FRB está a punto de transformarse gracias a una nueva generación de telescopios. El Explorador para la Red Australiana del Kilómetro Cuadrado (ASKAP), con un gran campo de visión, entró en funcionamiento en 2012 y enseguida comenzó a descubrir FRB. En el momento de escribir estas líneas conocemos 50 explosiones. Algunos instrumentos que ya existían, como el VLA o el radiotelescopio Molonglo, de la Universidad de Sídney, se están renovando para mejorar su sensibilidad y su cobertura del cielo. Y los radiotelescopios que están comenzando a operar ahora, como el Experimento Canadiense de Cartografiado de Hidrógeno o el Telescopio Esférico de Quinientos Metros de Apertura (FAST), en China, deberían hallar muchas más FRB y proporcionarnos una mejor comprensión de sus fuentes.

Algunos de estos telescopios pueden localizar FRB en tiempo real con una precisión del orden del segundo de arco, lo que supone una mejora considerable de nuestra capacidad para ubicarlas en el cielo. Además, esta información nos permite comenzar a realizar observaciones en otras longitudes de onda y encontrar así la galaxia donde se produjo la explosión. Una perspectiva muy emocionante es que algunos modelos de FRB, como el basado en la fusión de estrellas de neutrones, predicen que los estallidos de radio tendrían que verse acompañados de ondas gravitacionales. Hoy estas perturbaciones del espaciotiempo pueden detectarse gracias a laboratorios como LIGO, en EE.UU., y Virgo, en Italia. Una observación de este tipo permitiría medir algunas propiedades de las FRB que, como la masa de la fuente, resultan imposibles de obtener por otros medios.

Por último, si lográsemos descifrar la naturaleza de las FRB, podríamos usar este nuevo fenómeno para llevar a cabo un ambicioso proyecto: trazar un mapa del universo. Las investigaciones que buscan visualizar las grandes estructuras cósmicas están aún en sus primeras etapas. Las FRB podrían ser de gran ayuda en este sentido: son las únicas fuentes extragalácticas conocidas con escalas de tiempo lo suficientemente cortas para medir la dispersión intergaláctica y, por tanto, determinar la densidad de materia a lo largo de nuestra línea de visión. La densidad del medio intergaláctico constituye una predicción clave en distintos modelos de la estructura a gran escala del cosmos, por lo que las FRB podrían ayudarnos comprobar cuáles son viables y cuáles no.

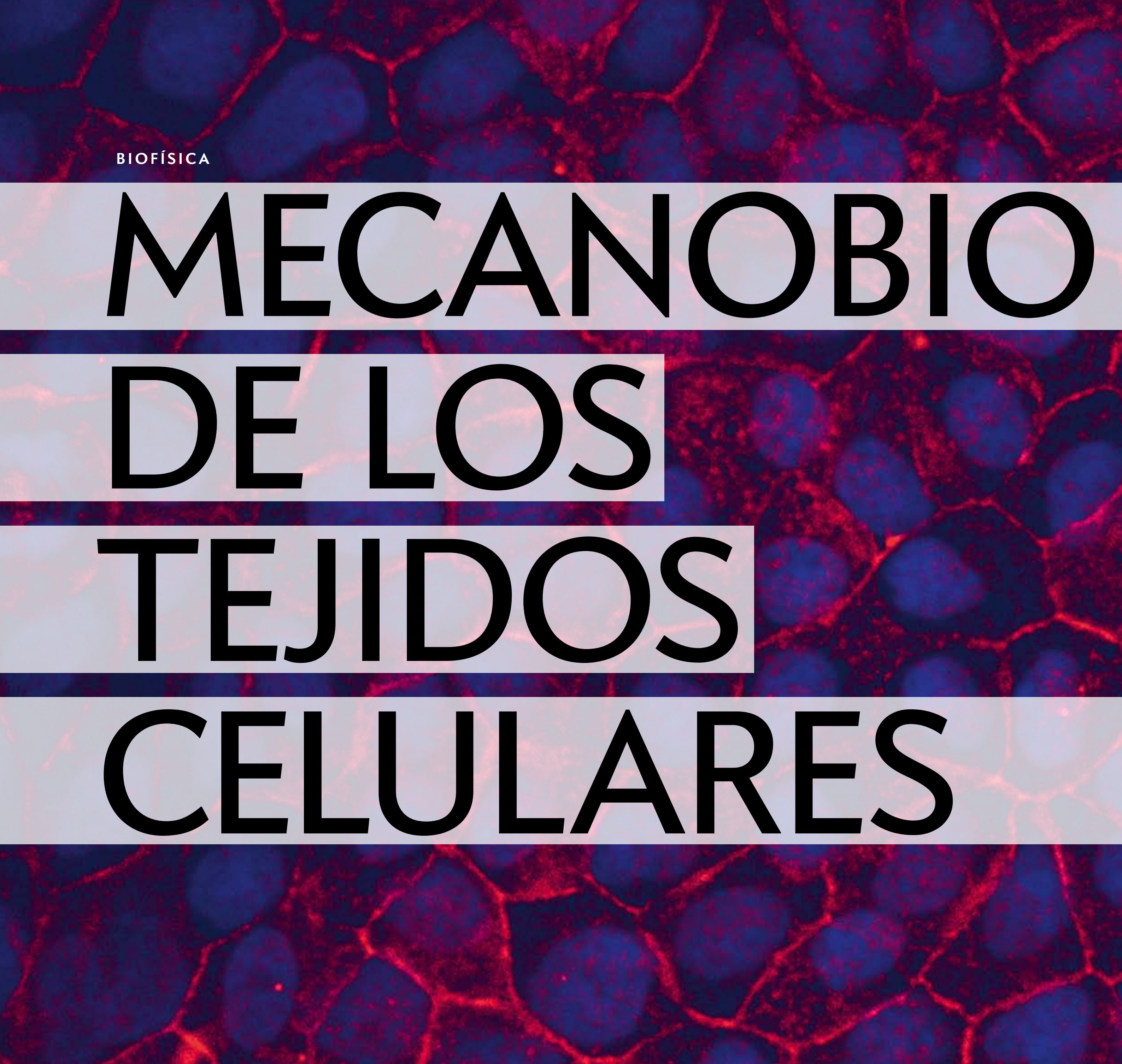
Ahora que hemos detectado numerosas FRB a lo largo de todo el cielo y hemos medido de manera independiente su distancia, esta línea de investigación pondrá a prueba nuestros conocimientos básicos sobre la formación y evolución del universo. No cabe duda de que el descubrimiento original de Narkevic ha resultado ser, en efecto, «bastante interesante». IyC

PARA SABER MÁS

A bright millisecond radio burst of extragalactic origin. Duncan R. Lorimer et al. en *Science*, vol. 318, págs. 777-780, noviembre de 2007.
A direct localization of a fast radio burst and its host. Shami Chatterjee et al. en *Nature*, vol. 541, págs. 58-61, enero de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Supernovas extrañas. Daniel Kasen en *IyC*, agosto de 2016.



BIOFÍSICA

MECANOBIOLOGÍA DE LOS TEJIDOS CELULARES

EN SÍNTESIS

La mecanobiología es una novedosa disciplina que explora el papel de las fuerzas físicas, más allá de las reacciones bioquímicas, en el desarrollo celular, la fisiología y las enfermedades.

Uno de los aspectos en los que se centra es el movimiento coordinado de las células en grupos, un fenómeno que interviene en importantes procesos biológicos, como la curación de una herida, la formación de los órganos o la invasión del tejido sano por parte de un tumor.

La identificación de las fuerzas que dirigen tales desplazamientos puede ayudarnos a diagnosticar y tratar mejor enfermedades como el cáncer.

LOGÍA

Más allá de los genes, las fuerzas físicas han resultado ser clave para comprender importantes funciones biológicas, entre ellas la migración conjunta de las células

Pilar Rodríguez Franco, Xavier Trepat y Raimon Sunyer

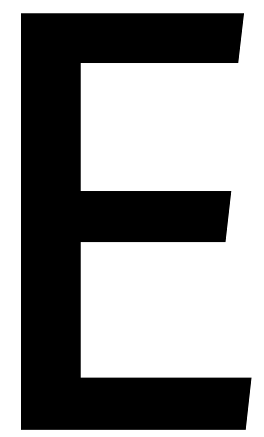
EL ESTUDIO DE MONOCAPAS de tejido epitelial, como esta que reproducimos aquí, ha permitido identificar las fuerzas que dirigen el movimiento conjunto de las células.

Pilar Rodríguez Franco es doctora en biomedicina y comunicadora científica en el Instituto de Bioingeniería de Cataluña (IBEC).



Xavier Trepat es profesor ICREA e investigador principal en el IBEC, el Instituto de Ciencia y Tecnología de Barcelona y el Centro de Investigación Biomédica en Red del área de Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN).

Raimon Sunyer es doctor en biomedicina e investigador sénior en el IBEC y el CIBER-BBN.



EL CONCEPTO DE FUERZA ESTÁ PROFUNDAMENTE INTEGRADO EN NUESTRA VIDA COTIdiana. Somos conscientes de su existencia en cada latido del corazón, a cada paso que damos o cada vez que respiramos. Parece entonces razonable pensar que las fuerzas que podemos ejercer y percibir a escala humana también estarán implicadas en las demás escalas que definen la vida: desde su unidad mínima, la célula, hasta los distintos tejidos y los órganos. Sin embargo, durante mucho tiempo la biología moderna ha intentado explicar la vida basándose únicamente en los procesos bioquímicos gobernados por los genes y las proteínas, mientras que ha ignorado la influencia que las fuerzas físicas (o la mecánica, en la jerga de este campo) pudieran desempeñar en las funciones biológicas.

Los últimos años han visto nacer una nueva disciplina, la mecanobiología, que adopta una visión integrada de la mecánica y la bioquímica de la célula y los tejidos para obtener una mejor descripción de numerosos procesos biológicos. Y es que cada vez está más claro que las señales físicas no solo son tan importantes como las bioquímicas, sino que entender su papel nos puede ayudar a tratar varias enfermedades en las que intervienen de forma destacada las fuerzas mecánicas, como la ateroesclerosis, la fibrosis o el cáncer.

Entendemos por mecanobiología la disciplina que explora el papel de las fuerzas mecánicas en el desarrollo celular, la fisiología y la enfermedad. Se trata de una ciencia multidisciplinar que combina conceptos de biología, bioquímica y física para intentar responder, entre otras, a las siguientes preguntas: ¿De qué modo las células individuales detectan las fuerzas y responden a ellas? ¿Cómo se pliegan y reorganizan los tejidos para formar estructuras tridimensionales durante el desarrollo de los órganos?

Aun siendo un campo relativamente joven, en los últimos 15 años la mecanobiología ha demostrado mediante experimentos que las fuerzas gobiernan un gran número de procesos biológicos. Por ejemplo, se ha observado que algunas células madre tienden a diferenciarse en tipos celulares distintos dependiendo de la rigidez de su entorno. También se ha demostrado que la apoptosis (muerte programada de las células) y la división celular, funciones esenciales para el mantenimiento de los tejidos, son reguladas por señales físicas.

Tal vez donde la mecanobiología ha arrojado más luz en los últimos años ha sido en lo relativo a la migración conjunta de las células que forman los tejidos epiteliales (los que recubren la superficie interna y externa de los organismos). Al estar constituidos por células agrupadas, sin espacios entre ellas, estas se mueven en grupos de manera coordinada pero manteniendo el contacto con las vecinas. Esta migración armónica, que recuerda a la forma en que los peces o las aves se coordinan para viajar de forma más eficiente, es responsable de cerrar huecos cuando un tejido sufre una herida o de definir la forma final de un órgano durante la morfogénesis. No obstante, para entender plenamente estos procesos, es necesario medir experimentalmente una magnitud fundamental pero que durante décadas se ha mostrado escurridiza: la fuerza.

Nuestro grupo se interesa precisamente por identificar y cuantificar esas fuerzas. Para ello hemos desarrollado nuevas técnicas de laboratorio que nos permiten medir y cartografiar las fuerzas que se producen entre una célula y otra o entre una célula y la matriz circundante. Combinamos esas técnicas con el análisis computacional de la forma y la velocidad de las células para caracterizar con detalle la dinámica de los tejidos. Nuestros trabajos han permitido describir las fuerzas que dirigen la migración conjunta de las células, un conocimiento que arroja nueva luz sobre procesos donde esta interviene, como la formación de los órganos, la reparación de las heridas y el cáncer, y del que pueden derivarse importantes aplicaciones clínicas.

DESCUBRIENDO LAS FUERZAS CELULARES

La noción de que las fuerzas físicas podrían explicar procesos biológicos esenciales ya existía mucho antes de que la misma mecanobiología se considerara una disciplina científica. Hace más de un siglo, el biólogo matemático D'Arcy Thompson publicaba su célebre obra *Sobre el crecimiento y la forma*, donde explicaba cómo las fuerzas definen el tamaño y la forma de los seres vivos. Pero no fue hasta 1980 cuando los avances tecnológicos

PÁGINAS ANTERIORES: IMAGEN CEDIDA POR CARLOS PÉREZ-GONZÁLEZ

Medir las fuerzas celulares

Cuantificar las fuerzas celulares que intervienen en procesos fundamentales de nuestro organismo supone un reto. El desarrollo de la técnica de microscopía de tracción ha permitido medirlas. Esta consiste en sembrar las células de interés sobre un gel que contiene esferas fluorescentes, las cuales sirven de marcadores. Las fuerzas que imprimen las células sobre el gel se calculan a partir de los desplazamientos de las esferas en un tiempo dado. Abajo se detalla el estudio de una sola célula y de grupos de ellas en movimiento.

Las fuerzas en una célula

La célula sembrada se adhiere al sustrato y lo deforma. En el interior del gel, las esferas fluorescentes se desplazan solidariamente.

Tiempo 1

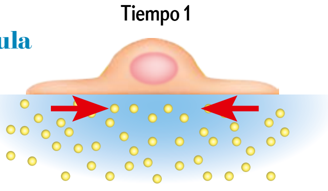
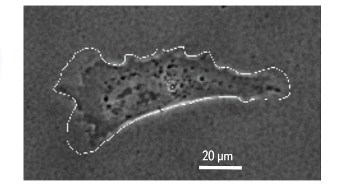
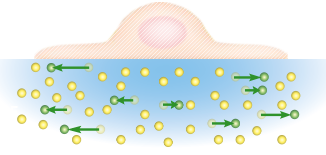


Imagen de la célula al microscopio



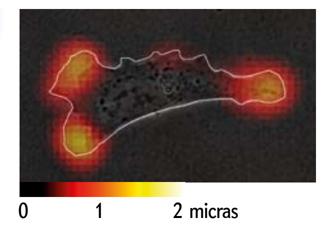
Cuando se elimina la célula del sustrato, el gel vuelve a su posición relajada y las esferas fluorescentes también.

Tiempo 2

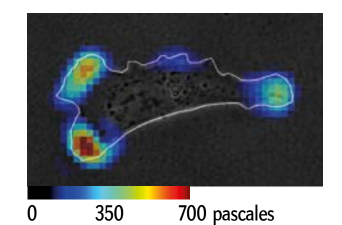


A partir de la diferencia entre la posición inicial (*tiempo 1*) y la final (*tiempo 2*) de las esferas, se consigue un mapa de desplazamientos que refleja las deformaciones que la célula adherente había ejercido en el gel.

Mapa de los desplazamientos superpuesto a la imagen de la célula

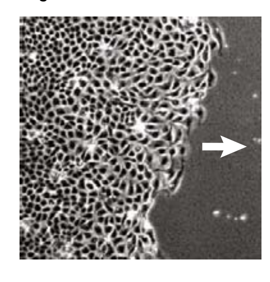


Mapa de las fuerzas de tracción superpuesto a la imagen de la célula

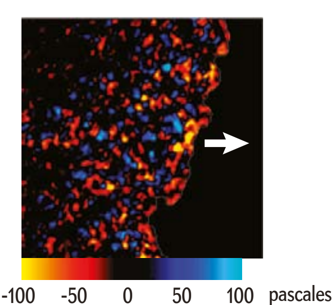


A partir de los datos de los desplazamientos, mediante la aplicación de las leyes de Newton para los medios continuos, se obtienen las fuerzas de tracción que las células estaban ejerciendo sobre el sustrato mientras estaban adheridas. (Las fuerzas se miden respecto a superficies, por lo que se expresan en unidades de presión: pascales.)

Monocapa de células migrando colectivamente

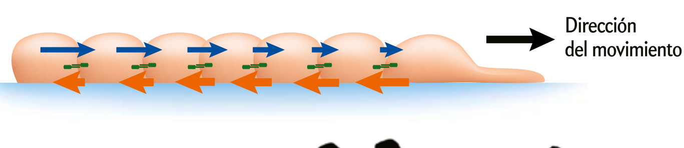


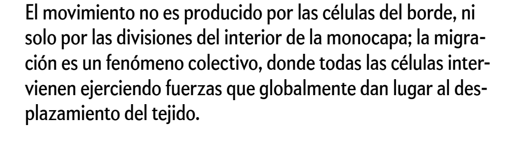
Mapa de las fuerzas de tracción en la dirección del movimiento



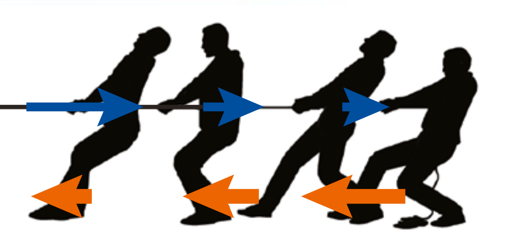
Las fuerzas en grupos de células

Cuando se aplica la técnica a una monocapa de células que se están desplazando, se obtiene un mapa de las fuerzas de tracción para el conjunto de las células. En él se observa que las células del borde tienden a ejercer fuerzas negativas (*amarillo y naranja*), hacia el interior de la monocapa. En el resto de la monocapa, las fuerzas fluctúan entre valores negativos y positivos (*lila y azul*).





El movimiento no es producido por las células del borde, ni solo por las divisiones del interior de la monocapa; la migración es un fenómeno colectivo, donde todas las células intervienen ejerciendo fuerzas que globalmente dan lugar al desplazamiento del tejido.

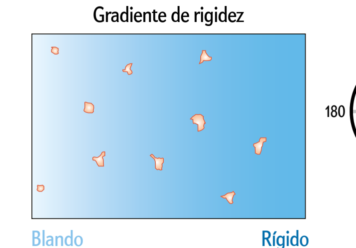


Gracias a la distribución local de fuerzas, el tejido mantiene el equilibrio mecánico global, igual que lo hacen los miembros de un equipo en el juego del «tira y afloja».

La influencia del entorno celular

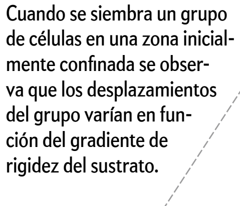
Las células tienden a moverse de las zonas más blandas a las más rígidas del sustrato en el que se desplazan, un fenómeno denominado durotaxis. Se trata de un mecanismo relevante en nuestro organismo, en el que existe una gran variedad de rigideces entre tejidos. Una serie de experimentos ha demostrado la orientación de la migración y las fuerzas implicadas en la durotaxis.

Orientación de la migración:
Cuando se siembran células por separado en un sustrato que presenta un gradiente de rigidez, estas solo se mueven ligeramente hacia la zona más rígida, según indica el histograma de la dirección de los desplazamientos (*derecha*).

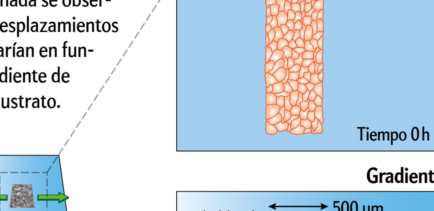


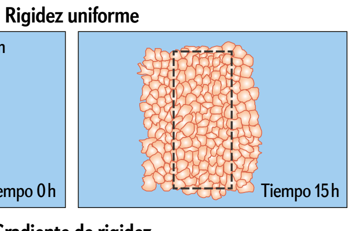
90
180
0
270

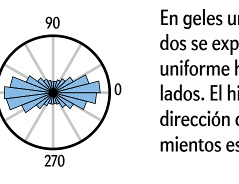
En el histograma, cada barra indica la frecuencia con la que se desplazan las células en una dirección.

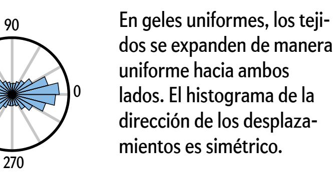


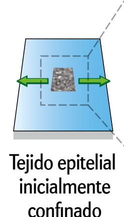
Rigidez uniforme



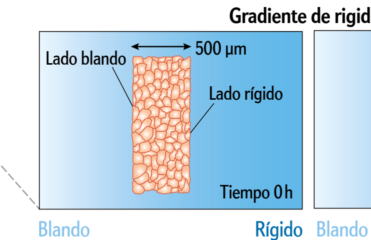


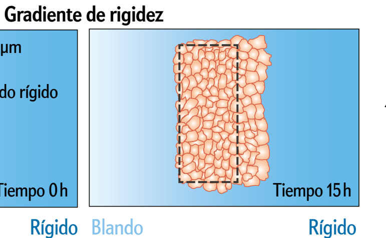


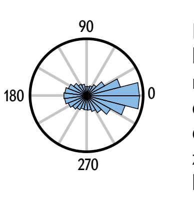




Gradiente de rigidez







En gradientes de rigidez, los tejidos se expanden de manera más eficiente hacia el lado rígido. El histograma de la dirección de desplazamiento está sesgado hacia la zona rígida

permitieron obtener pruebas directas de que las fuerzas existían también a escala celular y se pudo medir su magnitud. Así, en un trabajo histórico, científicos de la Universidad de Carolina del Norte observaron que las células adherentes (las que necesitan una superficie para crecer, a diferencia de las que se hallan en suspensión, como las sanguíneas) tenían la capacidad de arrugar el sustrato elástico sobre el que se habían sembrado.

Dos décadas después, Micah Dembo, de la Universidad de Boston, y Yu-Li Wang, de la Universidad Carnegie Mellon, desarrollaron un marco experimental y matemático capaz de cuantificar esas fuerzas. Su enfoque fue simple y solo era aplicable a células adherentes aisladas. En primer lugar, sembraron las células que querían estudiar sobre un sustrato elástico, de rigidez conocida y en el que se habían incluido esferas fluorescentes que hacían de marcadores. Tomaron imágenes microscópicas de las células y de las esferas, respectivamente. Los investigadores observaron que, cuando las células ejercían fuerzas sobre el sustrato, este se deformaba y, como consecuencia, las esferas fluorescentes se desplazaban respecto a su posición relajada inicial. Para poder cuantificar estos desplazamientos, retiraron las células mediante un tratamiento con tripsina (una proteína que rompe los enlaces peptídicos que unen la célula con el sustrato) al final del experimento. Esto les proporcionó una imagen de la configuración relajada del sustrato. Comparando en las dos imágenes la posición de las esferas fluorescentes —deformadas y relajadas—, y teniendo en cuenta las propiedades mecánicas del sustrato, calcularon un mapa preciso de las fuerzas ejercidas por la célula contra el sustrato, conocidas como fuerzas de tracción. Esta técnica, que se denominó microscopía de fuerzas de tracción, marcó un punto de inflexión en la comprensión de la célula como un elemento mecánico. Más tarde, el desarrollo detallado —matemático y tecnológico— de este principio permitiría el descubrimiento de fenómenos inherentes a la dinámica de tejidos, capaces de explicar la migración celular colectiva o la curación de heridas.

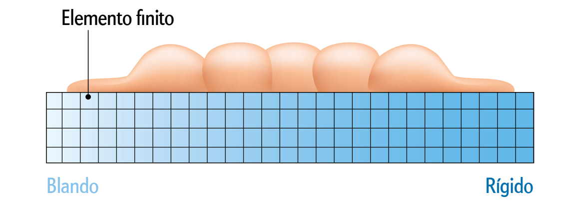
LAS FUERZAS AL SERVICIO DE LA MIGRACIÓN

En numerosos procesos biológicos, como la formación de los tejidos durante el desarrollo embrionario o durante la cicatrización de las heridas, las células se desplazan en grupos, en lo que se conoce como migración celular colectiva. Desde hacía mucho tiempo, el funcionamiento de este fenómeno había permanecido oculto. ¿Es la acción de las células líderes en la parte delantera del tejido el origen del movimiento global? ¿O este se produce como consecuencia de la presión generada por la división celular en el interior del tejido, que empujaría a las células hacia delante?

La microscopía de fuerzas de tracción, que nuestro grupo ha adaptado para estudiar tejidos, ha proporcionado una respuesta a esas preguntas. Como modelo experimental, hemos empleado monocapas de células epiteliales de riñón canino (de la línea celular Madin-Darby). Hemos investigado el comportamiento migratorio de grupos de células de manera muy controlada, al cultivarlas sobre geles de poliacrilamida. Se trata de un material elástico y transparente que las células pueden deformar y que, además, nos permite trabajar con un microscopio. Otra

Las fuerzas implicadas:

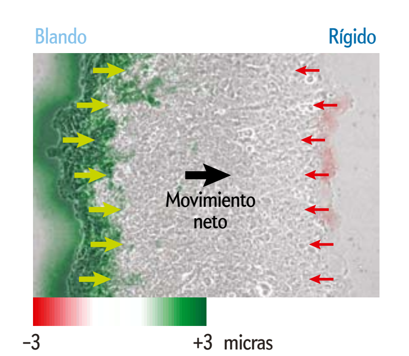
Para calcular las tracciones en un sustrato de rigidez variable hemos usado el método de elementos finitos. Consiste en dividir el gel en pequeñas porciones, o elementos finitos, cada uno de los cuales tiene una rigidez constante que aumenta de izquierda a derecha. Resolver las ecuaciones de Newton dentro de cada elemento permite saber qué fuerzas desempeñan las células situadas encima del gel (*derecha*).



Blando Rígido

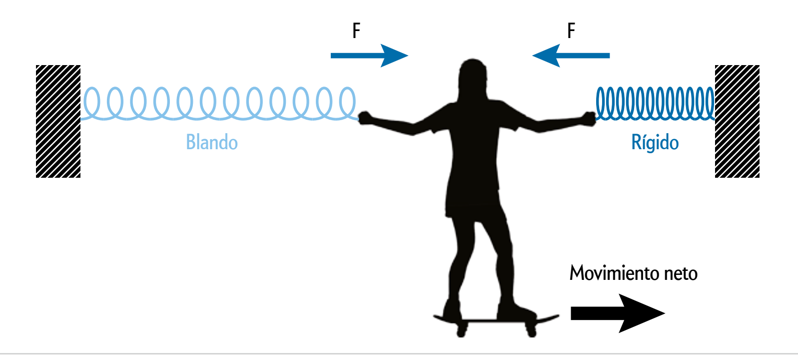
-1 +1 kilopascales

Fuerzas
El mapa de fuerzas revela grandes tracciones en los dos bordes, que favorecen la expansión. En ambos, los valores son equivalentes, pese a corresponder a rigideces muy distintas.



Desplazamientos
La durotaxis colectiva se explica por el hecho de que las deformaciones del sustrato blando (*flechas verdes*) son mayores que las del rígido (*flechas rojas*).

Analogía mecánica
La durotaxis colectiva puede equipararse al movimiento de una persona en un monopatín que agarra dos muelles: uno de constante elástica pequeña (blando) y otro de constante elástica grande (duro). Si tira con la misma fuerza de los dos muelles (F), el blando se deformará más que el duro, por lo que se deslizará hacia el lado de este.



CORTESÍA DE LOS AUTORES

de las ventajas de estos geles es la posibilidad de controlar sus propiedades mecánicas con mucha exactitud, de forma que podemos fabricarlos más duros o más blandos en función del tipo celular con el que trabajemos o del experimento que realicemos. Durante el proceso de fabricación, incorporamos al gel esferas fluorescentes de unos centenares de nanómetros de diámetro. La técnica resulta muy robusta y nos permite hacer experimentos que duran desde decenas de segundos hasta varios días, con lo que podemos estudiar un gran número de fenómenos celulares.

Los resultados de nuestros experimentos de microscopía de tracción permiten obtener un mapa de las fuerzas que ejercen las células durante la migración. Estos mapas nos han ayudado a entender mejor el mecanismo que subyace a este fenómeno colectivo. En primer lugar, hemos observado que no solo las células líderes del tejido ejercen tracción, sino que muchas otras participan activamente de la migración y aplican fuerzas sobre el sustrato. Además, estas fuerzas se transmiten de una célula a otra a través de las uniones celulares (unos diminutos ganchos que las unen entre sí) y se propagan a través de largas distancias. Hemos comprobado que la fuerza de tracción promedio en la monocapa de células no se concentra en los bordes, sino que se reduce progresivamente hacia el interior del tejido.

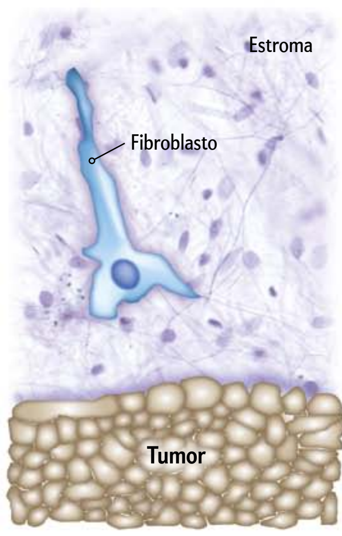
¿Cómo podemos interpretar ese resultado? Básicamente, los mapas de tracción revelan que las células del tejido no son arrastradas por las células líderes ni tampoco son empujadas por la presión de las divisiones dentro del tejido, sino que todas las células están globalmente implicadas en un «tira y afloja» entre ellas, similar al que encontramos en un patio de colegio. Este aparente juego de niños entre células es en realidad un fenómeno colectivo emergente, parecido al que se observa en un hormiguero, un banco de peces o una bandada de pájaros. Este tipo de movimiento de tira y afloja entre células ha sido observado en otros contextos, como en la cicatrización de heridas y la progresión del cáncer.

LAS FUERZAS QUE GUÍAN A LAS CÉLULAS

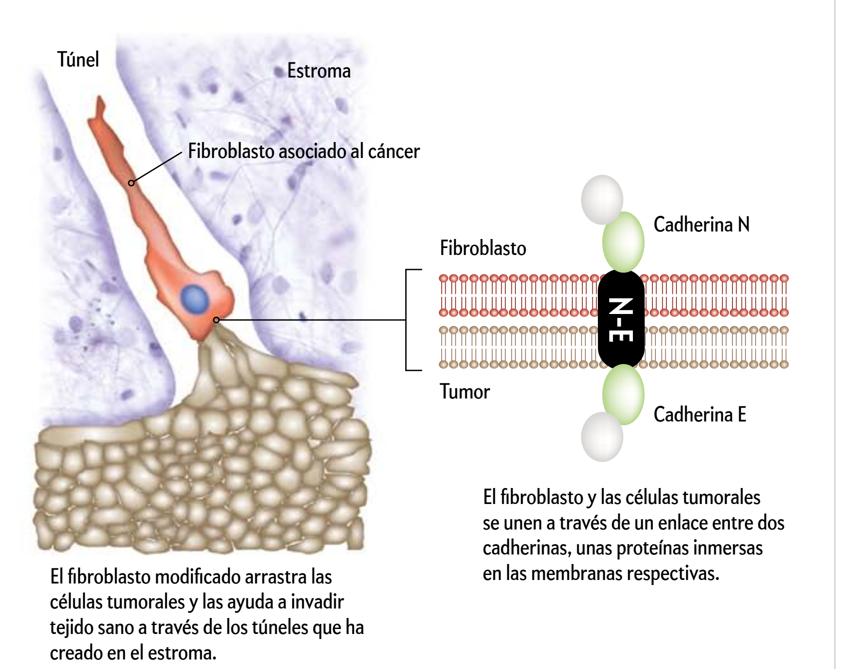
Partiendo de esta visión basada en el «tira y afloja» local e incesante entre células vecinas, cabe preguntarse cómo las células deciden avanzar en conjunto en una dirección particular del espacio y no en otra. Muchas veces, esta migración direccional es promovida por estímulos externos que guían el movimiento. El ejemplo más conocido es la quimiotaxis, que es la capacidad de las células de seguir gradientes de concentración de sustancias químicas. Durante mucho tiempo, se había propuesto que los estímulos mecánicos también podían ejercer un papel relevante. Aunque parezca un parámetro sin importancia, la rigidez del entorno celular puede variar mucho entre diferentes tejidos, incluso en varios órdenes de magnitud. Ello depende, básicamente, de la composición de la matriz extracelular, la sustancia donde se hallan inmersas las células. De este modo, el cerebro es unas 4000 veces más blando que el cartílago, mientras que el músculo esquelético tiene una rigidez intermedia. El entorno celular también puede cambiar su rigidez debido a factores patológicos, como en el caso de los tumores malignos, que son más rígidos que el tejido sano que los rodea.

Las fuerzas en el cáncer

Además de intervenir en procesos biológicos normales, las fuerzas se hallan también implicadas en varias enfermedades, como el cáncer. Se sabe que este suele extenderse siguiendo gradientes de rigidez en su entorno. Pero, además, se ha descubierto un nuevo mecanismo de metástasis: los tumores atrapan fibroblastos, un tipo de células que organizan la matriz circundante del tumor, y se valen de ellos para propagarse a otros tejidos.



El tumor «secuestra» un fibroblasto en la matriz circundante del tumor, o estroma. Este modifica la actividad del fibroblasto, que se convierte en un fibroblasto asociado al cáncer.



El fibroblasto modificado arrastra las células tumorales y las ayuda a invadir tejido sano a través de los túneles que ha creado en el estroma.

El fibroblasto y las células tumorales se unen a través de un enlace entre dos cadherinas, unas proteínas inmersas en las membranas respectivas.

Imaginemos ahora que una célula se sitúa sobre un sustrato con regiones de diferente rigidez. En el año 2000, Dembo y Wang observaron que las células individuales tienden a moverse de las regiones blandas a las rígidas de la matriz extracelular. Esta migración se denomina durotaxis, término que proviene del latín *durus* (duro) y el griego *taxis* (acción ordenada). Aun así, este mecanismo siempre había demostrado ser poco eficiente en los estudios con células aisladas, los cuales indicaban solo una leve tendencia en la migración dirigida.

Intrigados por este peculiar mecanismo, en nuestro laboratorio decidimos sembrar grupos de células, en vez de células individuales, sobre sustratos que presentaban un gradiente de rigidez (obtenidos mediante una técnica denominada fotopolimerización), lo cual reproduce de manera más fidedigna la disposición de las células en los órganos y los tejidos. Para simplificar el experimento, confinamos inicialmente las células en patrones rectangulares, mucho más cortos en la dirección del gradiente que en su dirección perpendicular. Esta configuración nos permitió hacer una importante aproximación: despreciar los movimientos y las fuerzas del lado largo (perpendicular al gradiente) y concentrarnos en la dinámica del lado corto (paralelo al gradiente). Sorprendentemente, observamos que el conjunto de células sí detectó de forma clara el gradiente y, de hecho, se desplazó en masa hacia el lado rígido del sustrato. ¿Qué explicaba el distinto comportamiento de nuestro tejido celular respecto al de las células individuales de los experimentos anteriores al nuestro?

Mediante la aplicación de una técnica conocida como análisis de elementos finitos obtuvimos mapas de fuerzas. Estos demostraban que en los bordes del tejido se producían grandes tracciones que favorecían la expansión, mientras que en el centro tenían lugar tracciones más bajas y sin una orientación característica. Los dos bordes opuestos mostraban unos valores de fuerza equivalentes, pese a corresponder a fuerzas ejercidas por el tejido sobre sustratos de rigideces muy distintas: blandas como el tejido adiposo en un extremo, y duras como el tejido muscular en el otro. Entonces, ¿cómo podíamos explicar lo que observábamos, que el tejido migrara de forma conjunta en una dirección y no en la otra? La respuesta la hallamos en las deformaciones provocadas en el gel. Los desplazamientos del sustrato sí que mostraban diferencias entre los dos bordes: eran mayores en el borde blando que en el rígido. Por consiguiente, el avance neto del tejido hacia la región de mayor rigidez se debe a la deformación distinta del sustrato entre el borde blando y el rígido. Una analogía mecánica para entenderlo sería imaginar a una persona subida en un monopatín y agarrada, a un lado y al otro, a dos muelles de distinta rigidez (o constante elástica). Si la persona tira de los dos muelles con la misma fuerza, deformará mucho más el muelle blando que el duro y, como consecuencia, se deslizará sobre el monopatín hacia el lado más rígido, el del muelle más duro. Lo mismo sucede con las células.

Estos resultados explican por qué la durotaxis es menos eficiente en las células individuales que en tejidos multicelulares. En una célula aislada, la diferencia en la rigidez de un extremo al otro de ella no es lo suficientemente grande como para activar la durotaxis de manera efectiva. En cambio, los grupos multicelulares actúan como una «supercélula»: debido al gran tamaño del grupo, la variación en la rigidez de un extremo al

otro del tejido será mucho mayor que en las células individuales. En consecuencia, la durotaxis será más eficiente. El hecho de que un grupo de individuos de un colectivo respondan de forma más eficiente a los estímulos de su entorno en conjunto que por separado a menudo se conoce como inteligencia colectiva. Este fenómeno se ha observado en los grupos de células durante la quimiotaxis, en los bancos de peces durante la fototaxis (que se mueven siguiendo un gradiente de luz) e incluso en los grupos de personas que juegan a videojuegos de rol en línea.

LA MECÁNICA ENTRE EL TUMOR Y SU ENTORNO

Aunque tal vez se piense que la descripción del fenómeno de la durotaxis no tiene una aplicación directa, lo cierto es que podría ser de gran relevancia en el estudio del cáncer. Desde la antigüedad se sabe que los tumores son más rígidos que el tejido que los rodea. Ahora que sabemos que las células migran preferentemente hacia regiones de mayor rigidez, podríamos pensar que, a través de mecanismos físicos, este endurecimiento estuviera facilitando la invasión de células cancerosas más allá del tumor inicial.

Aún más sorprendentes resultan las últimas observaciones realizadas por nuestro laboratorio, las cuales ofrecen un nuevo paradigma en nuestra comprensión de cómo se expanden los tumores y progresa el cáncer. Hemos comprobado que las células cancerosas se enganchan a un tipo de células sanas y utilizan la fuerza física de estas para escapar de los tumores e iniciar la metástasis. Las víctimas de este «secuestro» son los fibroblastos, células encargadas de sintetizar y organizar la matriz extracelular y que crean corredores en los tejidos para desplazarse a través de ellos. Los fibroblastos no solo construyen corredores más allá del tumor, sino que ejercen fuerzas físicas para arrastrar las células cancerosas a través de ellos, lo que promueve la invasión directa del tejido sano. El mecanismo puede equipararse a un tren circulando por un túnel: los fibroblastos son las locomotoras y las células cancerosas, los vagones.

El principal reto ha radicado en identificar el modo mediante el que las células cancerosas se adhieren a los fibroblastos. Al medir las fuerzas mediante microscopía de tracción hemos descubierto que se producía una interacción biofísica entre dos proteínas, una localizada en la superficie de las células cancerosas, la E-cadherina, y otra en la superficie de los fibroblastos, la N-cadherina. Estas proteínas, miembros de la gran familia de las cadherinas, se sitúan en la membrana celular y desempeñan un papel fundamental en las uniones intercelulares: funcionan como ganchos de escala nanométrica que hacen posible la unión entre células y mantienen cohesionados los tejidos. Pese a la distinta naturaleza de ambas proteínas, nuestras observaciones revelan que a través de tal unión se transmite la fuerza necesaria para que los fibroblastos tiren de las células cancerosas más allá del tumor.

Esta comprensión de la mecánica entre fibroblastos y células tumorales puede ayudarnos a encontrar curas para el cáncer. Una posibilidad consistiría en desarrollar fármacos que impidieran las uniones entre ambas células, lo que equivaldría a cortar la cuerda en nuestro modelo del «tira y afloja». De acuerdo con esta idea, hemos demostrado en ensayos in vitro que, cuando se cultivan tumores sólidos con fibroblastos mutantes incapaces de establecer uniones entre las dos mencionadas cadherinas, las células cancerosas pierden la capacidad de invadir tejidos sanos. Aunque todavía estamos en una fase muy temprana de desarrollo, este ejemplo ilustra cómo los avances en el tratamiento del cáncer posiblemente incorporarán mecanismos descubiertos desde la mecanobiología.

LOS NUEVOS RETOS

A la luz de los últimos avances, no queda duda de que las señales mecánicas son fundamentales para explicar muchos procesos biológicos de relevancia en la salud y la enfermedad. La migración de tejidos epiteliales es solo un ejemplo de cómo un sencillo concepto mecánico —el tira y afloja— nos puede ayudar a entender un mecanismo migratorio universal, presente en procesos biológicos complejos como la morfogénesis o la cicatrización de heridas, así como en enfermedades como la fibrosis y el cáncer. Pero a medida que el campo de la mecanobiología sigue creciendo, se enfrenta a nuevos retos. Uno de los más emocionantes consiste en traducir los hallazgos en aplicaciones clínicas. Los primeros esfuerzos se centran en diagnosticar patologías en las que se ven alteradas las propiedades mecánicas de las células o los tejidos.

El ejemplo más importante lo hallamos en el cáncer, en el que la rigidez de un tejido puede indicar si una célula es tumoral o sana. De esta forma, determinando la dureza de grandes poblaciones celulares procedentes de biopsias, podríamos desarrollar una nueva herramienta de diagnóstico. En este afán por usar marcadores mecánicos para diagnosticar enfermedades destacan los grupos de Jochen Guck, de la Universidad Técnica de Dresde, y Dino Di Carlo, de la Universidad de California en Los Ángeles. Ambos han desarrollado sistemas de microfluídica que permiten medir las propiedades mecánicas de un gran número de células procedentes de muestras de sangre o fluido pleural. Mediante este enfoque, el grupo de Di Carlo ha conseguido evaluar la rigidez de distintas poblaciones de células en derrames pleurales y predecir con precisión el estado de la enfermedad en pacientes con cáncer.

Otra aplicación sería la creación de nuevos fármacos. En el caso de la metástasis, se podrían utilizar las uniones E-N cadherina entre células cancerosas y fibroblastos como diana terapéutica. Este es solo uno de los múltiples ejemplos donde la mecanobiología puede inspirar una herramienta de diagnóstico o incluso un fármaco.

En los últimos 40 años, hemos entendido que las fuerzas físicas tienen un papel muy relevante en múltiples procesos biológicos esenciales. Aun así, la mecanobiología es un campo relativamente joven y desconocemos el posible calado que sus observaciones tendrán en el futuro. En los próximos años, esperamos que sean múltiples las estrategias que se basen en estas nuevas y poderosas observaciones sobre la biología de la célula. IyC

PARA SABER MÁS

Cell movement is guided by the rigidity of the substrate. Chun-Min Lo et al. en *Biophysical Journal*, vol. 79, n.° 1, págs. 144-152, 2000.
Physical forces during collective cell migration. Xavier Trepat et al. en *Nature Physics*, vol. 5, págs. 426-430, 2009.
Collective cell durotaxis emerges from long-range intercellular force transmission. Raimon Sunyer et al. en *Science*, vol. 353, pags. 1157-1161, 2016.
A mechanically active heterotypic E-cadherin/N-cadherin adhesion enables fibroblasts to drive cancer cell invasion. Anna Labernadie et al. en *Nature Cell Biology*, vol. 19, n.° 3, págs. 224-237, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Mecánica de la migración celular. Xavier Trepat en *IyC*, noviembre de 2009.
Una forma indirecta de domar el cáncer. Rakesh K. Jain en *IyC*, abril de 2014.
Fuerzas mecánicas en las células. Stefano Piccolo en *IyC*, diciembre de 2014.
Tejidos vivos que se comportan como cristales líquidos. Linda S. Hirst y Guillaume Charras en *IyC*, noviembre de 2017.

por Laura Toral, Miguel Rodríguez e Inmaculada Sampedro

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

Biotensioactivos microbianos

Las sustancias producidas por ciertas bacterias pueden aprovecharse para combatir plagas agrícolas, entre otras aplicaciones

Vivimos rodeados de organismos que tienen la capacidad de sobrevivir en ambientes desfavorables gracias a las adaptaciones fisiológicas que han desarrollado a lo largo de la evolución. Numerosas bacterias, por ejemplo, producen metabolitos secundarios con propiedades tensioactivas (o surfactantes), de los que se valen para defenderse de otros organismos. Se trata de compuestos de carácter anfipático, es decir, con una cabeza hidrófila y una cola hidrófoba, y ejercen su acción al alterar la superficie de contacto entre dos fases (por ejemplo, la doble capa lipídica de las membranas plasmáticas).

El estudio de estos compuestos para su aplicación en la industria ofrece una importante alternativa al empleo de tensioactivos sintéticos, mucho más contaminantes. Los tensioactivos bacterianos se utilizan hoy en la biorremediación de ambientes contaminados y en las industrias petrolera, alimentaria, farmacéutica y biomédica, así como en la agrícola. Por lo que respecta a esta última, numerosos estudios han demostrado la eficacia de los biotensioactivos en el control de distintas plagas y microorganismos fitopatógenos que afectan a los campos de cultivo y ocasionan grandes pérdidas económicas.

En nuestro grupo de la Universidad de Granada y en la empresa Xtrem Biotech hemos investigado la capacidad de los biotensioactivos producidos por distintas cepas bacterianas, aisladas de diferentes ambientes, como posibles agentes de control biológico. Hemos demostrado su eficacia ante el hongo fitopatógeno *Botrytis cinerea*, que tiene un gran impacto económico en la viticultura. No solo reducen el crecimiento del hongo en más del 70 por ciento, sino que también alteran la morfología de este, que desarrolla conidióforos (estructuras de resistencia) como respuesta a la presencia de los biotensioactivos. También resultan útiles en el control de plagas de insectos: provocan mortalidades próximas al 60 por ciento en pulgones de la especie *Rhopalosiphum padi*, que ataca principalmente a los cereales. Los biotensioactivos causan una elevada deshidratación y alteraciones notables en la cutícula de los pulgones.

El resultado de nuestra investigación demuestra la idoneidad de dichos compuestos para su aplicación en la industria agrícola. Presentan la ventaja añadida, respecto a los tensioactivos sintéticos, de que son biodegradables, resisten condiciones extremas de *p*H, salinidad y temperatura, y no son tóxicos.

—Laura Toral
Centro de Investigaciones Biomédicas (CIBM)
de la Universidad de Granada y Xtrem Biotech S.L.
—Miguel Rodríguez e Inmaculada Sampedro
CIBM, Universidad de Granada

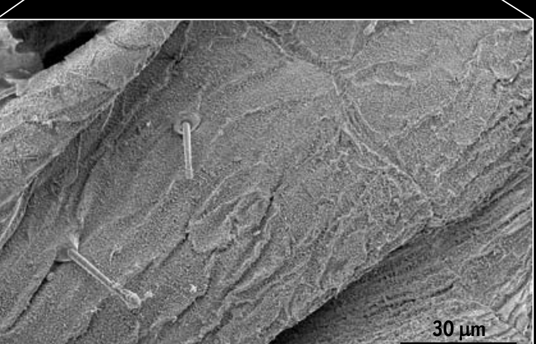


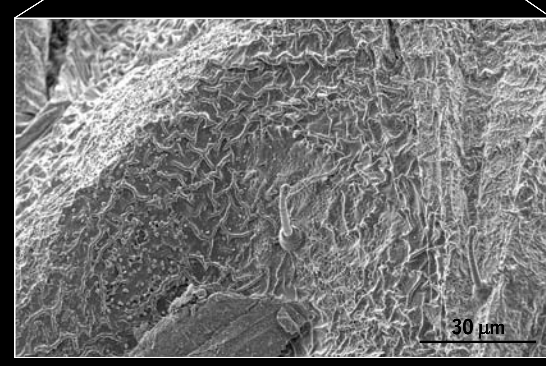
EL PULGÓN DE LOS CEREALES, *Rhopalosiphum padi*, ocasiona grandes pérdidas en la agricultura. En la imagen, adulto alado.

LUISA FERNÁNDEZ (*pulgones*); CENTRO DE INSTRUMENTACIÓN CIENTÍFICA, UNIVERSIDAD DE GRANADA (*cutículas y micelios fúngicos*)





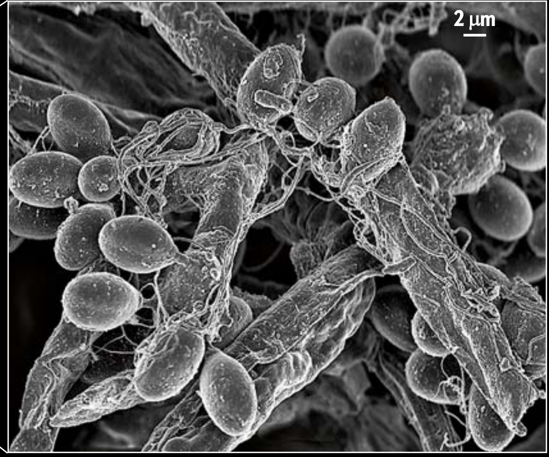


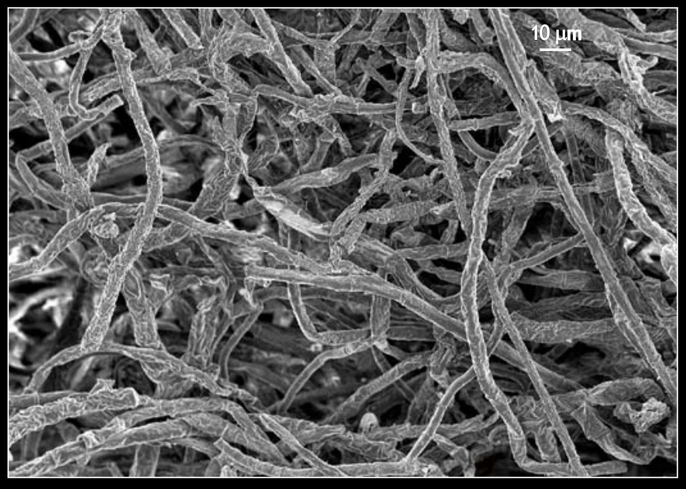


PULGONES de *Rhopalosiphum padi* antes (*izquierda*) y después (*derecha*) de ser tratados con el tensioactivo producido por una cepa de *Bacillus atrophaeus* (estereomicroscopía). Este compuesto parece alterar las propiedades hidrofóbicas de la capa más externa de la cutícula (*imágenes inferiores*), lo que provoca la deshidratación del insecto y la entrada de enzimas que destruyen las capas más internas (microscopía electrónica de barrido).



EN ESTA PLACA DE PETRI, una cepa bacteriana (*izquierda*) produce biotensioactivos que causan daños en las paredes celulares del hongo *Botrytis cinerea* y frena su avance (*derecha*).





EL HONGO *Botrytis cinerea*, ante la imposibilidad de germinar y crecer como micelio normal (*abajo*), desarrolla numerosos conidios, unas estructuras reproductoras de resistencia (*izquierda*). (Microscopía electrónica de barrido.)

por Carmen Magallón



Carmen Magallón es doctora en ciencias físicas y catedrática de física y química de instituto. Es autora de *Pioneras españolas en las ciencias: Las mujeres del Instituto Nacional de Física y Química* (Editorial CSIC, 1998).

Las jóvenes científicas del «Rockefeller» (1931-1939)

El potencial heurístico de la historia de las mujeres en la ciencia

En los años noventa del siglo pasado, poco se sabía —más bien nada— sobre las primeras mujeres que entraron en los distintos campos científicos en España. Fue necesaria una dosis no pequeña de audacia y hasta de fe para lanzarse a indagar sobre ellas. De audacia, porque nadie apostaba por un tema como aquel, más bien todo lo contrario, para una tesis doctoral; y de fe, porque antes de explorar las fuentes documentales no había ningún signo de que en el primer tercio del siglo xx hubiera habido científicas en este país. También fue necesario disponer de un modelo para la tarea. En este caso lo ofreció, como referencia fundamental, el trabajo de Margaret Rossiter *Women scientists in America* (dos volúmenes publicados en 1982 y 1984, respectivamente). Rossiter había trazado magistralmente cómo hacer visibles a las primeras científicas que, aun sin encajar en el paradigma de «los grandes personajes», habían resquebrajado barreras institucionales y profesionales y merecían un lugar en la historia de la ciencia.

España distaba mucho de Estados Unidos, pero de nuevo se confirmó la idea de que tanto el mundo como la historia están llenos de datos a la espera de ser rescatados, y que basta con echar las redes adecuadas para obtenerlos. Esa confluencia de actitudes, deseos y modelo —a la que se sumó el apoyo del grupo de historia de la ciencia de la Universidad de Zaragoza, la celebración de congresos internacionales, y la estancia de un semestre en uno de los *colleges* femeninos de la costa este de Estados Unidos, el Smith College— cuajaría en el libro *Pioneras españolas en las ciencias: Las mujeres del Instituto Nacional de Física y Química*, publicado por la autora de este artículo en 1998.

Podemos decir que la obra, que ahora cumple veinte años, se ha convertido en un clásico para la comunidad científica especializada, si bien es aún desconocida en otros ámbitos y entre el gran público. El libro contenía la primera base de datos que identificaba a las pioneras españolas en ciencia, proporcionaba un marco teórico y una metodología para contextualizarlas, y realizaba un estudio pormenorizado del grupo de las que trabajaron en uno de los centros de investigación más destacados de la España del primer tercio del siglo xx: el Instituto Nacional de Física y Química (INFQ).



DOROTEA BARNÉS el día de su graduación en el Smith College de Northampton, en Massachusetts, en junio de 1930. Tras su regreso a España, Barnés introdujo la espectroscopía Raman en nuestro país.

DOROTEA BARNÉS

Exploradoras científicas

A principios del siglo xx, los trabajos llevados a cabo en los laboratorios de la Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas (JAE) y, en particular, los estudios sobre magnetoquímica desarrollados desde 1910 por Blas Cabrera en el Laboratorio de Investigaciones Físicas, habían llamado la atención de la Fundación Rockefeller. Como consecuencia, en los años veinte la institución comenzó a negociar con el Gobierno español la donación al país de un centro de investigación. Este sería el INFQ, conocido en los años treinta como «el Rockefeller» por haber sido construido con dinero de esa fundación.

El INFQ funcionó con cierta normalidad desde finales de 1931 hasta 1937. En esos años hubo jóvenes investigadoras en prácticamente todos los equipos. Hasta 36 de ellas llegaron a trabajar en sus distintas secciones: electricidad y magnetismo, rayos X, espectroscopía, química-física, química orgánica y electroquímica. De ellas, fueron espectroscopía (bajo la dirección de Miguel Catalán) y química-física (bajo la de Enrique Moles) las que contaron con un mayor número de mujeres: 7 y 14, respectivamente. La mayoría eran licenciadas en químicas, jóvenes que estaban empezando sus carreras, así como becarias y colaboradoras que preparaban su tesis o las oposiciones a enseñanza media, una salida muy valorada en aquellos años. Sus nombres, procedencias, becas y publicaciones se encuentran pormenorizados en *Pioneras*.

Pertenecientes en su mayoría a la clase media ilustrada, ligada a los núcleos republicanos, el grupo de mujeres del INFQ se compuso de alumnas brillantes e investigadoras fructíferas. Se apreciaba en ellas la influencia de las ideas de la Institución

Libre de Enseñanza, a través del Instituto Escuela y del Laboratorio Foster de la Residencia de Señoritas de Madrid, centros con los que muchas estuvieron relacionadas.

Cuando en los años noventa entrevisté a algunas, estas pioneras eran ya nonagenarias, y creo que eso me empujó siempre a llamarlas cariñosamente «mis señoras». Pero en sus años del INFQ todas eran veinteañeras, pues la mayoría habían nacido entre 1900 y 1910. Felisa Martín Bravo, nacida en 1898 y primera española doctora en físicas (1926), era la mayor. Otra de ellas, Dolores Pardo Gayoso, escribiría años más tarde en *El País* sobre cómo se vivió la inauguración del Rockefeller y los porqués de la «enorme emoción» que generó: «Primero, por el salto formidable que supuso ser oídos en América hasta conseguir el dinero necesario para hacer realidad el anhelo de don Blas, y por su prestigio; y después, la de encontrarse con este motivo en nuestro humilde Madrid, que empezaba a aletear en todos los campos del saber —y este era el más arduo—, casi toda la flor y nata de la ciencia mundial de entonces. Esta que suscribe creyó desvanecerse cuando en el banquete de celebración la sentaron al lado de la deliciosa *madame* Curie» (*El País*, 1 de julio de 1982).

Pardo Gayoso, nacida en La Coruña, fue la única en la sección de electricidad y magnetismo, que dirigía Blas Cabrera. Allí colaboró en los trabajos sobre susceptibilidades magnéticas hasta que, en 1933, obtuvo la cátedra de matemáticas en el Instituto de Ceuta.

Un ejemplo ilustre: Dorotea Barnés

Dorotea Barnés fue una de aquellas pioneras a las que todavía pude entrevistar. Licenciada en química con premio extraordinario, en 1929 recibió una pensión de la JAE para viajar al Smith College, en Northampton, Massachusetts. Allí se introdujo en el manejo de la espectroscopía para el análisis químico bajo la dirección de Mary Louise Foster, investigadora del departamento de química y fundadora del laboratorio que llevaba su nombre en la Residencia de Señoritas, al que Barnés había asistido durante sus años de universitaria.

En 1930, los datos espectrales que hoy se obtienen de manera automatizada debían hallarse mediante cuidadosas mediciones que exigían a su vez sólidos conocimientos de óptica. Sería de Gladys Anslow —doctora en física por Yale (1924), profesora del departamento de física del Smith y, más tarde, una de las asesoras científicas del proyecto Manhattan— de quien Barnés aprendería las técnicas espectroscópicas. El estudio *Algunas características químicas y el espectro de absorción de la cistina*, resultado de la colaboración entre Foster, Anslow y Barnés, daba cuenta de la estructura cristalina y molecular de esta sustancia, la cual forma parte de algunas proteínas del pelo y también de los cuernos. Ese trabajo le valdría a Barnés el posgrado en ciencias por el Smith College y constituiría el núcleo de su tesis.

De vuelta a España Barnés trabajó en la sección de espectroscopía del INFQ junto a Miguel Catalán, quien le encargó viajar a Graz, en Austria, al laboratorio del profesor Fritz Kohlrausch, para resolver ciertas dudas acerca de la aplicación del efecto Raman en la obtención de espectros de absorción, cuestión que en aquellos momentos estaba en el centro de la línea de investigación de la sección. De hecho, fue Barnés quien introdujo la espectroscopía Raman en nuestro país. Más tarde obtuvo la cátedra de física y química del Instituto Lope de Vega de Madrid. Su brillante carrera se vería truncada por el estallido de la guerra, que la condujo a exiliarse a Carcasona, junto con su marido y su hija de poco más de un año.

Una línea fructífera

La historia de la ciencia es a menudo considerada irrelevante para los saberes científicos experimentales. Sin embargo, puede constituir una magnífica fuente de inspiración: algunos de los problemas que quedaron como hilos sueltos en el pasado pueden ser retomados y resignificados en el presente. Y también de motivación, pues los modelos de trayectorias vitales y de trabajo científico de quienes nos han precedido pueden ayudar a las y los jóvenes a seguir sus pasos.

La historia de las mujeres en la ciencia sufre aún más resistencias. Pero si los trabajos que rompen inercias y cuestionan el edificio bien asentado de los poderes disciplinares pueden tener dificultades iniciales —y quienes osan realizarlos pagan indudablemente un precio—, a la larga, y ese es el valor de la ciencia, no hay miserias académicas capaces de ensombrecer un trabajo arraigado en bases sólidas.

De la riqueza heurística o la capacidad para generar nuevas indagaciones en la línea inaugurada con *Pioneras* dan cuenta las abundantes publicaciones relacionadas o surgidas de ella; sobre todo biográficas, pero no solo. Por su profundidad, resultan destacables los trabajos de Isabel Delgado Echeverría sobre las que investigaron en biología y genética. Su libro *El descubrimiento de los cromosomas sexuales* (CSIC, 2007) constituye un magnífico ejemplo de cómo integrar lo aportado por hombres y mujeres al dar cuenta de la historia de una teoría científica.

Pioneras ha fructificado también en otros planos, de los que mencionaré un par de ejemplos. Fue inspiración de la obra de teatro *Pioneras de la ciencia en España*, escrita por cinco dramaturgas bajo la coordinación de José Sanchis Sinisterra, director del Nuevo Teatro Fronterizo. La obra fue publicada en 2013 en la revista *Primer Acto* y presentada en lectura dramatizada en La Casa Encendida de Madrid ese mismo año. Por último, considero un logro reseñable el hecho de que las tres primeras doctoras en química formadas en la Universidad de Zaragoza, y primeras del país en este campo, Ángela García de la Puerta, María Antonia Zorraquino Zorraquino y Jenara Vicenta Arnal Yarza, mencionadas por primera vez en *Pioneras*, fueran objeto en 2018 de una exposición y un homenaje organizados por la facultad de ciencias químicas de dicha universidad. IyC

PARA SABER MÁS

El Laboratorio Foster de la Residencia de Señoritas: Las relaciones de la JAE con el International Institute for Girls in Spain, y la formación de las jóvenes científicas españolas. Carmen Magallón en *Asclepio*, vol. 59, n.º 2, págs. 37-62, julio-diciembre de 2007.

La historia de los cromosomas sexuales: Un hito en la historia de la Biología. Isabel Delgado Echeverría. Editorial CSIC, 2007.

Jenara Vicenta Arnal Yarza: Una científica y catedrática pionera en España. Natividad Araque Hontangas en *Faisca*, vol. 13, n.º 15, págs. 27-49, octubre de 2008.

Del Laboratorio de Investigaciones Físicas a la meteorología: La primera española doctora en física, Felisa Martín Bravo. Carmen Magallón en *La Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas en su centenario*, vol. I, págs. 762-791, Publicaciones de la Residencia de Estudiantes, 2010.

EN NUESTRO ARCHIVO

La polémica de los sexos en la historia de la ciencia. Montserrat Cabré en *IyC*, octubre de 2014.

Las mujeres en la ciencia de hoy. Esther Rubio Herráez en *IyC*, diciembre de 2014.

Mujeres y ciencia en la España de la Ilustración. Elena Serrano en *IyC*, abril de 2015.

La ciencia tiene un problema de género. Hannah A. Valentine en *IyC*, abril de 2017.

por Catharine I. Paules y Anthony S. Fauci

Catharine I. Paules es responsable médica en la Oficina de Dirección del Instituto Nacional de Alergia y Enfermedades Infecciosas de los Estados Unidos (NIAID). **Anthony S. Fauci** es director del NIAID.



La necesidad de una vacuna universal contra la gripe

Cien años después de la letal pandemia de 1918, el riesgo persiste

Este año se cumple un siglo de una de las epidemias infecciosas más terribles de las que se tiene constancia: la pandemia de gripe de 1918 que se calcula que provocó entre 50 y 100 millones de muertes en todo el mundo.

Varios motivos explican la sobrecogedora mortalidad: en primer lugar, la mayoría de las personas posiblemente no estuvieran inmunizadas contra la nueva cepa vírica; en segundo lugar, puede que esta fuese especialmente mortífera; en tercer lugar, el hacinamiento y las malas condiciones higiénicas permitieron que la enfermedad se propagase con enorme rapidez, sobre todo en las regiones con menos acceso a la atención sanitaria; por último, aún faltaban varios decenios para que aparecieran los fármacos antivíricos y las vacunas antigripales.

El pasado siglo se lograron grandes avances en todas esas áreas, pero seguimos sin estar preparados para la inevitable aparición de un virus como el de hace cien años. De hecho, solo en Estados Unidos las epidemias ordinarias de gripe matan entre 12.000 y 56.000 personas al año, porque los virus estacionales evolucionan continuamente y, aunque actualicemos las vacunas con frecuencia, su efectividad puede quedarse limitada al 40 o 60 por ciento. Además, la protección que confieren las vacunas estacionales contra una pandemia es poca o nula. Los virus pandémicos suelen formarse por un proceso denominado «salto antigénico», que consiste en la adquisición, normalmente a partir de los virus de la gripe animal, de uno o varios genes nuevos (como parece ser que ocurrió en 1918, porque los ocho genes del virus pandémico eran nuevos).

Desde 1918, se han producido tres pandemias de gripe asociadas con saltos antigénicos: en 1957, en 1968 y en 2009. No obstante, en cada uno de estos casos, los nuevos virus surgieron al mezclarse genes de virus de la gripe animal con los genes de virus descendientes del de 1918, que ya circulaban en la población humana, de forma que muchas personas gozaban al menos de cierta inmunidad parcial. Esta situación, sumada a una menor patogenicidad de los virus y a las mejoras en la infraestructura sanitaria y los tratamientos, probablemente haya comportado que las pandemias sobrevenidas desde entonces hayan sido menos catastróficas.

Ahora bien, tampoco podemos olvidar el problema de los virus «prepandémicos», es decir, los que tienen el potencial de provocar pandemias pero no lo han hecho (todavía). En las últimas dos décadas se han producido, con frecuencia creciente, infecciones humanas por virus de la gripe aviar. Se han elaborado vacunas prepandémicas contra varias cepas de los virus H5N1 y H7N9 y, en algunos casos, se han acumulado reservas de dichas vacunas, pero estas cepas aviares, al igual que los virus de la gripe estacional, evolucionan por el proceso de deriva antigénica dentro de las aves que las hospedan. Muchos de los virus aviares H7N9 que saltaron de las aves de corral a los humanos y causaron brotes infecciosos en China en 2016 y 2017 han variado notablemente en relación con las cepas aviares de 2013. Por consiguiente, las respuestas inmunitarias generadas en el ser humano por una vacuna creada contra el virus A de 2013 (H7N9) probablemente no sean eficaces contra las cepas de 2017.


CHRISTINA UNG

La asombrosa capacidad de los virus de la gripe para sortear la inmunidad de las poblaciones humanas gracias a la deriva y los saltos antigénicos nos vuelve vulnerables a un desastre de salud pública igual de grave que la pandemia de 1918. Para afrontar este problema sanitario mundial, los científicos están intentando diseñar «vacunas antigripales universales», es decir, nuevos tipos de inoculaciones que inmunicen no solo contra los virus estacionales, sino también contra los virus pandémicos que irremediablemente aparecerán en el futuro.

Hace poco, el Instituto Nacional de Alergia y Enfermedades Infecciosas de EE.UU. organizó un taller, con renombrados expertos en el campo de la gripe, sobre la necesidad de encontrar vacunas antigripales más eficaces. Entre los muchos obstáculos que dificultan la confección de una vacuna universal, el más importante es que no conocemos del todo las respuestas inmunitarias que nos protegen de la gripe, como la función que ejercen las superficies de las mucosas.

Una solución es diseñar una vacuna que genere anticuerpos contra fragmentos víricos comunes a todas las cepas y que sean poco propensos a mutar. También resulta crucial aclarar cómo funcionan otros elementos del sistema inmunitario, en conjunción con los anticuerpos, para defendernos ante una infección gripal. Los obstáculos para crear una vacuna universal son colosales, pero somos optimistas y confiamos en poder conseguirla con las herramientas existentes y las estrategias experimentales. En el centésimo aniversario de la pandemia de 1918, conviene que recordemos la importancia de seguir investigando en este sentido, para evitar que se repita una de las peores calamidades sanitarias de la historia de la humanidad. IyC

CLIMA

EL ÁRTICO BATE UN RÉCORD TRAS

COLAPSO



ESTOS ICEBERGS desprendidos del glaciar Jakobshavn, en Groenlandia, bordean la población de Ilulissat bajo el sol de medianoche.

OTRO Y PERTURBA EL TIEMPO EN EL RESTO DEL PLANETA

Jennifer A. Francis

O ÁRTICO

EN 2003, VEINTICINCO CIENTÍFICOS tuvimos una revelación sobre el Ártico. La Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU. nos había invitado a celebrar un encuentro en Big Sky, Montana. Antes de esa reunión, cada uno de nosotros había limitado la investigación del Ártico a sus propios objetivos. Pero, al compartir nuestros estudios, llegamos a una inquietante conclusión: los cambios que habíamos observado por separado se relacionaban a la perfección entre sí. La totalidad del sistema ártico se dirigía hacia un nuevo estado de precariedad, y toda esperanza de detenerlo parecía improbable.

Publicamos un artículo que recogía una conclusión tan asombrosa como controvertida: de mantenerse aquella velocidad de cambio, existía la posibilidad de que, al cabo de un siglo, se viese un Ártico carente de hielo durante el verano, algo que no ha ocurrido en miles de años. Hoy me alarmo de nuevo al comprobar que el océano podría perder todo su hielo en el verano de 2040, 60 años antes de lo que vaticinamos entonces.

Jennifer A. Francis es investigadora del Departamento de Ciencias Marinas y Costeras de la Universidad Rutgers. Está especializada en el cambio climático del Ártico y su influencia en el resto del planeta.



Los cambios que está experimentando el Ártico son los previstos por los científicos, pero ocurren con mucha mayor rapidez que lo calculado hasta por las predicciones más pesimistas. Las observaciones recientes se salen de cualquier gráfico. En tan solo tres años se han desmoronado más de una docena de récords climáticos que habían permanecido estables durante décadas, como los referentes a la desaparición del hielo marino estival, a una menor cantidad de hielo durante el invierno, al calentamiento del aire y a la descongelación del suelo.

Dicha tendencia vaticina problemas para la población mundial. En la última ocasión en que el Ártico alcanzó unas temperaturas ligeramente más cálidas que las actuales, hace unos 125.000 años, la superficie oceánica estaba entre 4 y 6 metros más elevada. Adiós a Miami, Nueva Orleans, gran parte de la ciudad de Nueva York y de Silicon Valley, así como a Venecia, Londres y Shanghái. Las últimas investigaciones indican que el rápido calentamiento del Ártico tiende también a modificar la corriente en chorro de una forma que causa una inusual persistencia de fenómenos meteorológicos extremos en Norteamérica, Europa central y Asia. Ello somete a millones de personas a implacables olas de calor, sequías e incesantes tormentas. El plancton está aumentando en el sur del océano Ártico, lo que podría desestabilizar cadenas tróficas de las que dependen bancos de pesca. Además, al deshielo masivo se une una enorme masa de agua dulce localizada al sur de Groenlandia que quizás esté ralentizando la corriente del Golfo, algo que podría alterar notablemente la dinámica meteorológica de los continentes que flanquean el Atlántico. ¿A que se debe este cambio vertiginoso?

ADIÓS A UN HIELO «ETERNO»

Los científicos invierten un gran esfuerzo en observar el Ártico porque es muy sensible al cambio climático. Actúa como señal de alerta para el sistema climático global. La larga lista de récords que se han batido en los últimos años pone de manifiesto que las inquietantes simulaciones climáticas de las últimas décadas están bien encaminadas. Pero los datos revelan algo aún más relevante: nuestras predicciones con respecto a los cambios que se avecinan podrían estar pecando de moderadas.

En tan solo 40 años, la extensión de hielo ártico durante el verano se ha reducido a nada menos que la mitad. El volumen de hielo a lo largo de un año es también mucho menor: cerca de una cuarta parte del registrado a comienzos de la década de 1980. Hasta hace poco, se pensaba que tales extremos no se alcanzarían, como pronto, hasta mediados de siglo.

EN SÍNTESIS

El cambio rápido que experimenta el clima ártico ha batido al menos una docena de récords en los últimos tres años.

El hielo marino desaparece, la temperatura del aire aumenta, el permafrost se descongela y los glaciares se funden.

Al alterar la corriente en chorro y el vórtice polar, el calentamiento incrementa la persistencia de las olas de calor, las sequías, las heladas severas y las lluvias torrenciales en todo el planeta.

Deshielo en Groenlandia

La masa del casquete glaciar de Groenlandia ha disminuido desde 2002, año en que comenzó a estudiarse por satélite su influencia en la gravedad terrestre. La contribución del agua del deshielo a la elevación del nivel del mar aumenta a mayor velocidad que la de cualquier otro factor.

Pérdida de hielo (billones de toneladas)

0, −1, −2, −3, −4

1979, 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2017

Extensión máxima anual del hielo (millones de kilómetros cuadrados)

16, 14, 12, 10, 8, 6, 4, 2, 0

Volumen medio del hielo en invierno (miles de kilómetros cúbicos)

32, 28, 24, 20, 16, 12, 8, 4, 0

Anomalía de la temperatura del aire en invierno (grados C)

Media en 32 años (1979-2010)

6, 3, 0, −3

Anomalía de vapor de agua en invierno (kilogramos por metro cuadrado)

Media en 32 años (1979-2010)

6, 3, 0, −3

Exceso del calentamiento anual del Ártico respecto al de las latitudes medias (grados C)

Anomalía anual de la temperatura en latitudes medias (línea de base)

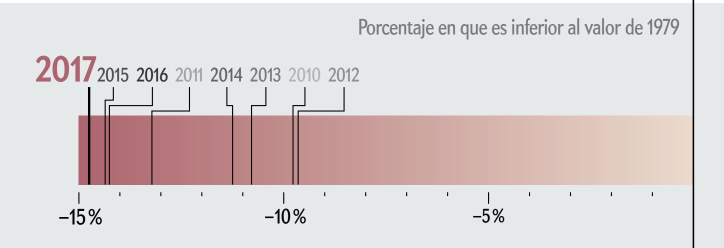
3, 2, 1, 0, −1

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES

Un Ártico sin precedentes

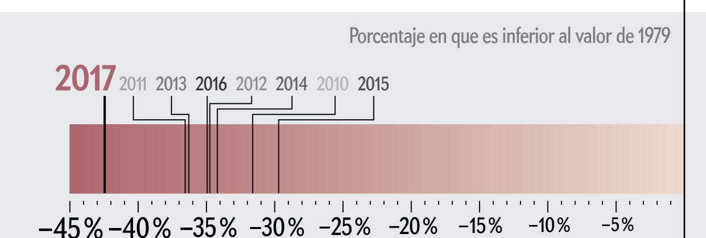
Los rápidos cambios que está experimentando el Ártico afectarán a miles de millones de personas en todo el planeta. En los últimos tres años se han batido numerosos récords climáticos, en ocasiones con márgenes sorprendentemente amplios. A continuación se muestran seis ejemplos notables. Los números en rojo indican récords históricos; los valores de los años recientes reflejan una tendencia hacia tales niveles. Por sí solo, cada fenómeno afecta al entorno y a la vida de los habitantes de la región. En conjunto, todos ellos alteran el clima del hemisferio norte. Su efecto culminante es la amplificación ártica (*último gráfico*), la cual incrementa la probabilidad de condiciones meteorológicas extremas durante todo el año.





Extensión del hielo marino en invierno

A medida que avanza el invierno, el hielo ártico se expande. Sin embargo, su extensión máxima ha ido disminuyendo, sobre todo en los mares de Barents y Bering. Una menor cubierta de hielo permite que el océano abierto emita más calor y humedad hacia la atmósfera, lo que provoca cambios meteorológicos.

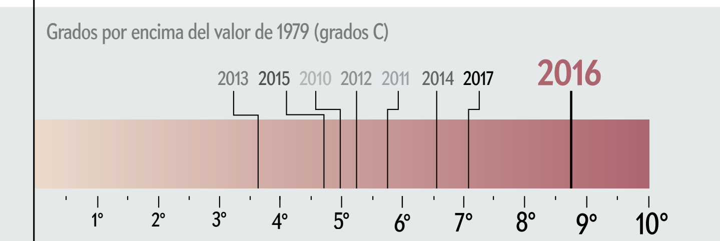


Volumen del hielo marino en invierno

En 2017, la cantidad de hielo invernal que flotaba en el Ártico había disminuido en un alarmante 42,5 por ciento con respecto a 1979. El viento puede desplazar con mayor facilidad unos bloques de hielo más delgados y dejar atrapadas embarcaciones y poblaciones costeras. Un hielo más delgado también se derrite con mayor rapidez en los meses cálidos. En el mismo intervalo de tiempo, el volumen de hielo durante el verano ha disminuido en un 80 por ciento.

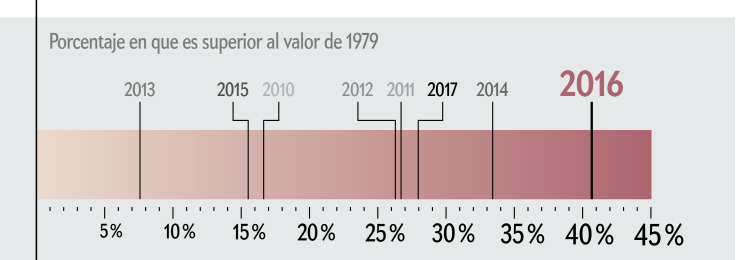
Temperatura del aire en invierno

En determinados días, las temperaturas del Ártico pueden ascender 20 grados Celsius por encima de lo normal, y hoy ya son elevadas durante todo el invierno. En 2016, la temperatura media invernal superó en casi 9 grados la de 1979. Esta tendencia puede debilitar la corriente en chorro, lo que ocasionaría rachas de frío intenso y precipitaciones de nieve en EE.UU., Europa y Asia.



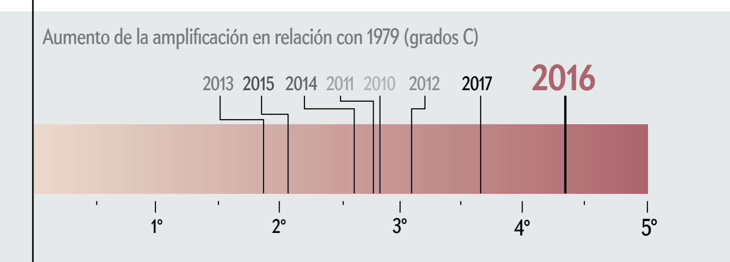
Vapor de agua en invierno

Al reducirse la cubierta de hielo, la apertura de una mayor superficie oceánica aporta más humedad a la atmósfera. Un incremento modesto puede tener grandes consecuencias: el vapor de agua es un gas con efecto invernadero que retiene calor y que, además, libera su calor latente al condensarse en forma de nubes, que a su vez pueden intensificar el calentamiento.



Amplificación ártica

El Ártico se está calentando mucho más rápido que el resto del planeta. Tal «amplificación» supone que la temperatura media del Ártico se está aproximando a la temperatura promedio de las latitudes medias. Ello ralentiza la corriente en chorro y hace que aumenten las probabilidades de que el hemisferio norte experimente fenómenos meteorológicos más persistentes y extremos, como olas de calor, inundaciones, períodos fríos y tal vez huracanes de mayor duración.



FUENTES: MISIÓN GRACE MASCON DEL LABORATORIO DE PROPULSIÓN A CHORRO (JPL) DE LA NASA OCÉANO, HIELO Y ALTURA EQUIVALENTE DE AGUA RL05M.1 VERSIÓN FILTRADA (CRI) 2. D. N. WIESE, D.-N. YUAN, C. BOENING, F. W. LANDERER Y M. M. WATKINS. PO.DAAC, JPL, 29 DE ABRIL DE 2016. ACCESO A LOS DATOS: 14 DE FEBRERO DE 2018 (*hielo de Groenlandia*); INSTITUTO NACIONAL JAPONÉS DE INVESTIGACIONES POLARES Y AGENCIA JAPONESA DE EXPLORACIÓN AEROESPACIAL. TOMADO DEL SISTEMA DE ARCHIVOS DE DATOS SOBRE EL ÁRTICO (*extensión de hielo*); MODELO PIOMAS, CENTRO DE CIENCIAS POLARES (*volumen de hielo*); NCEP/NCAR REANALYSIS 1. DIVISIÓN DE CIENCIAS FÍSICAS, LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS TERRESTRES, NOAA (*datos de temperatura del aire, anomalías del vapor de agua y amplificación*)

El hielo marino estival está desapareciendo rápidamente debido a mecanismos de retroalimentación: círculos viciosos que pueden amplificar una pequeña variación. Por ejemplo, cuando un modesto aporte de calor derrite el hielo, blanco y brillante, queda expuesta una mayor superficie de agua, la cual refleja una menor cantidad de energía solar hacia el espacio. El calor absorbido calienta más la zona y derrite una mayor cantidad de hielo, lo que potencia el calentamiento. En invierno, sin el brillo del Sol, intervienen otras retroalimentaciones. Por ejemplo, el hielo que flota en el Ártico actúa como una capa aislante que impide la liberación del calor y la humedad subyacentes. Si ese hielo retrocede, un mayor aporte de calor y humedad calentará más el aire y retrasará así la formación de hielo. Por lo general, en las simulaciones informáticas el hielo desaparece demasiado despacio, lo que ha hecho que las estimaciones del calentamiento futuro hayan sido moderadas.

Pero la desaparición del hielo marino no es la única transformación que nos quita el sueño. Los otros dos tipos de hielo ártico que solían considerarse permanentes también se están perdiendo con rapidez. El permafrost (suelo que normalmente permanece helado todo el año) se está descongelando. Se están viniendo abajo edificios construidos sobre él, los árboles se caen y las carreteras se comban. Además de afectar a la vida diaria de los lugareños, el derretimiento del suelo puede liberar enormes cantidades de gases que retienen calor. Cuando la materia orgánica que ha permanecido en el permafrost durante miles de años se descongela, las bacterias la descomponen y generan CO_2 (en condiciones aeróbicas) o metano (en condiciones anaeróbicas). El contenido en carbono del permafrost ártico es dos veces superior al de la atmósfera actual, de forma que una fusión generalizada podría acentuar notablemente el calentamiento global, lo que a su vez aceleraría el derretimiento. Los actuales modelos no reflejan del modo adecuado la influencia de la fusión del permafrost, algo que también contribuye a subestimar de modo considerable el calentamiento global futuro.

El tercer tipo de hielo ártico que antes era permanente es el agua helada del dominio continental, como los glaciares y el enorme casquete de Groenlandia, de unos dos kilómetros de espesor. La pérdida de ese hielo tiene graves consecuencias en todo el planeta, ya que, a diferencia del hielo marino que se funde, la escorrentía hacia el océano eleva el nivel del mar de forma directa. En verano de 2016, la masa total del casquete glaciar de Groenlandia (estimada a partir de mediciones por satélite de su grado de influencia en la gravedad terrestre) alcanzó su mínimo desde que en 2002 comenzaran las observaciones. Los valores también son menores que cualquier otro registrado desde finales de la década de 1950, cuando la masa se calculaba con otros métodos. Un estudio reciente indica que el rápido deshielo superficial de Groenlandia se acelera aún más debido al calentamiento asociado a un menguante hielo marino.



AGUA DE DESHIELO cayendo al mar desde un casquete glaciar en desintegración en Svalbard, Noruega.

GETTY IMAGES

UN AIRE MÁS CALIENTE Y HÚMEDO

La reducción del hielo marino y el rápido calentamiento del Ártico tienen otros efectos de gran alcance. La combinación de ambos fenómenos podría afectar a los vientos a gran altura y causar la transferencia de calor y humedad desde latitudes más meridionales hacia el Polo Norte. En 2012, el deshielo superficial de Groenlandia alcanzó un valor que por entonces fue récord como consecuencia de un frente de altas presiones atmosféricas inusualmente intenso y persistente (un bloqueo anticiclónico), el cual no solo supuso un aporte de calor y humedad desde el sur, sino también de hollín producido por los incendios forestales del hemisferio norte. Al oscurecerse su superficie a causa del hollín (y disminuir por tanto su albedo, o reflectividad), el hielo y la nieve absorben más energía solar, lo que a su vez acelera el deshielo: otro mecanismo de retroalimentación.

Los patrones de bloqueo, grandes remolinos formados en la corriente en chorro, parecen ser más frecuentes cerca de Groenlandia en las últimas décadas, sobre todo en verano. Ello probablemente explique parte del creciente deshielo. La pérdida de hielo observada en el verano de 2016 fue la tercera más voluminosa registrada tras las de 2010 y 2012. Uno de nuestros últimos estudios indica que, con gran probabilidad, el mayor número de bloqueos anticiclónicos guarde relación con el calentamiento global. Con todo, las simulaciones tienen dificultades para formar y deshacer bloqueos de forma realista, así que resulta difícil predecir la evolución de tales fenómenos.

Por último, existe otro proceso ártico igualmente peculiar. En los dos últimos inviernos, las olas de calor han ido batiendo récords sucesivamente en el Polo Norte. La causa reside en parte en que la reducción y el adelgazamiento del hielo marino debilitan la barrera que impide la transferencia del calor oceánico hacia el aire. Las pronunciadas ondulaciones de orientación norte-sur de la corriente en chorro también establecieron récords de calor y humedad en latitudes septentrionales elevadas. Con frecuencia, los científicos y los habitantes del Ártico no llegan a apreciar los fuertes efectos que puede tener una humedad adicional. El vapor de agua es un gas con efecto invernadero, de modo que, en una atmósfera ártica seca durante el invierno, una pequeña cantidad de humedad puede retener mucho más calor. Por otra parte, cuando esa humedad se condensa en forma de nubes, libera su calor latente y el aire se calienta todavía más. Finalmente, un mayor número de nubes atrapa más calor bajo ellas: otro factor que potencia el deshielo del Ártico.

ATRAPADOS EN LOS EXTREMOS

Pese a que todavía nos queda mucho por aprender, está claro que se está produciendo un cambio rápido en el Ártico, el más drástico en la historia de la humanidad. Ante esta cruda realidad, los científicos tratan de precisar qué consecuencias podría tener la alteración del Ártico en las poblaciones y los ecosistemas

del planeta, con el fin de que la sociedad pueda decidir cómo actuar y afrontar el futuro.

Las inundaciones costeras constituyen un claro ejemplo de esos efectos globales. De acuerdo con un nuevo informe de la Unión de Científicos Preocupados, unas 170 localidades costeras estadounidenses sufrirán inundaciones crónicas dentro de 20 años. Hacia finales de siglo, si las naciones mantienen las tasas actuales de emisión de CO_2, la mayor parte de las grandes ciudades costeras del planeta padecerán violentas inundaciones de forma regular. El informe, inquietantemente profético, se publicó unas semanas antes de que los huracanes Harvey, Irma y María culminaran la temporada de huracanes más destructiva y costosa jamás vivida en EE.UU.

Además, existen cada vez más pruebas de que un intenso calentamiento de la atmósfera inferior en el Ártico puede afectar a la corriente en chorro e incluso a los vientos situados a mayor altura, en la estratosfera, donde reside el vórtice polar que circunda la región. Los picos hacia el norte y los valles hacia el sur de la serpenteante corriente en chorro generan los centros de altas y bajas presiones que los mapas meteorológicos reflejan con una A y una B. Tales ondulaciones controlan la meteorología del hemisferio norte. Pero, si las curvas extremadamente grandes se tornan cada vez más frecuentes, cabrá esperar un mayor número de fenómenos meteorológicos extremos en lugares habitados por miles de millones de personas. Ello se debe a que las grandes curvas de la corriente en chorro tienden a progresar con mayor lentitud de oeste a este, lo que causa una mayor permanencia de los fenómenos meteorológicos que inducen. Pensemos en prolongadas olas de calor; lluvias incesantes; persistentes tormentas tropicales, como el huracán Harvey que arrasó Houston en agosto de 2017; o intensas temporadas de incendios, como la que padeció California el año pasado.

Los grandes meandros de la corriente en chorro, unidos a un intenso calentamiento del Ártico, pueden alterar el vórtice polar y prolongar heladas mortales o continuas tempestades de nieve, como el largo período de frío intenso que azotó el norte de EE.UU. a comienzos de este año. Un colapso del vórtice polar podría asimismo perpetuar los pronunciados giros de la corriente en chorro, que causan inauditas olas de calor en Alaska y en territorios más septentrionales, con la generación consiguiente de un nuevo círculo vicioso que aceleraría el calentamiento ártico. Algunos estudios apuntan a que el calentamiento se encuentra estrechamente relacionado con tales distorsiones ondulantes, mientras que otros sostienen que las pruebas de dicha conexión son endebles. Las investigaciones al respecto progresan con rapidez.

Con toda probabilidad, el calentamiento acelerado del Ártico alterará de manera significativa los hábitats terrestres y marinos. A medida que disminuye el hielo marino, ya han aparecido floraciones de plancton en nuevas áreas y en nuevas temporadas; a su vez, eso ha atraído hacia el Ártico especies de peces propias de latitudes más bajas al tiempo que desaparecían las nativas. En latitudes altas, la fusión primaveral temprana de la nieve ha causado la anticipación tanto del reverdecimiento de la tundra como de la aparición de insectos. Las aves migratorias, que emplean la duración de la luz diurna como temporizador, podrían llegar demasiado tarde para el festín en las regiones árticas donde se alimentan. Los habitantes del Ártico también sufren las consecuencias: el deshielo corta el paso a sus campos tradicionales de caza e incluso los obliga a abandonar algunas localidades, amenazadas por la erosión costera causada por el oleaje de las tormentas que se desencadenan en áreas litorales antes protegidas por el hielo. Al mismo tiempo, los grandes países y las grandes empresas se abalanzan sobre el Ártico en busca de nuevos recursos naturales, mientras crecen las tensiones sobre quién tiene derecho a reclamar como suya una parte del vasto y rico fondo marino.

La revelación que tuvimos mis colegas y yo en el retiro de Big Sky resuena en mi cabeza cada vez que un fenómeno meteorológico persistente causa estragos o se bate un nuevo récord en el Ártico. Ahora, mis vecinos se están haciendo eco. Las encuestas indican que la mayoría de los estadounidenses opinan que el deshielo ártico y la corriente en chorro (hoy convertida en una expresión cotidiana) causan fenómenos meteorológicos extraños. El viejo Ártico quizá fuera despiadado, pero era estable. El nuevo océano, menos predecible, podría estar cambiando para siempre y desencadenando un efecto dominó en las formas de vida de todo el planeta.

¿Pueden evitarse todavía las consecuencias? Sí y no. Debido a que el CO_2 tiene una prolongada vida en la atmósfera, y a que el clima responde con retraso al aumento de la concentración de gases de efecto invernadero, el cambio futuro ya se está gestando. Pero su magnitud y velocidad podrán reducirse si la sociedad actúa con presteza para aminorar las emisiones y si se desarrollan a tiempo métodos que retiren grandes cantidades de carbono de la atmósfera. Los avances en ambos frentes son rápidos, aunque probablemente resulten demasiado modestos y lleguen demasiado tarde para preservar la Tierra y el Ártico tal y como los hemos conocido hasta hoy. Preparémonos para lo inesperado. IyC

PARA SABER MÁS

Arctic matters: The global connection to changes in the Arctic. Consejo Nacional de Investigación de EE.UU. National Academies Press, 2015.

Amplified Arctic warming and mid-latitude weather: New perspectives on emerging connections. Jennifer A. Francis, Stephen J. Vavrus y Judah Cohen en *WIRE's Climate Change*, vol. 8, n.º 5, art. e474, septiembre/octubre de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

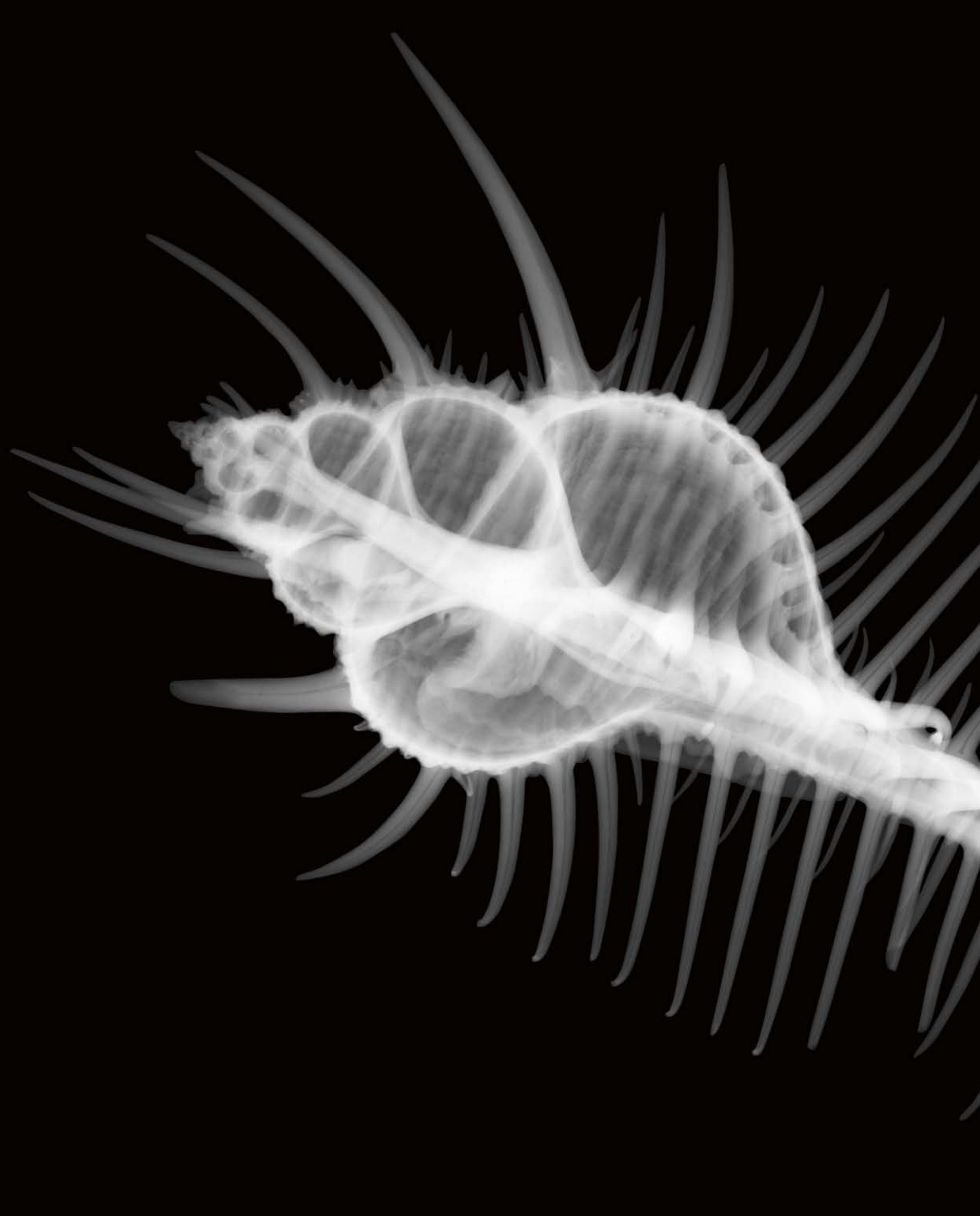
Calentamiento global: ¿Más rápido de lo previsto? John Carey en *IyC*, enero de 2013.

La corriente del Golfo y el invierno europeo. Stephen C. Riser y M. Susan Lozier en *IyC*, abril de 2013.

El comportamiento anómalo de la corriente en chorro. Jeff Masters en *IyC*, febrero de 2015.

La predicción del permafrost. Ted Schuur en *IyC*, marzo de 2017.

El enigma de las nubes. Kate Marvel en *IyC*, febrero de 2018.



MATEMÁTICAS

¿Cómo se forman las conchas marinas?

Los modelos matemáticos revelan las fuerzas mecánicas que guían el desarrollo de espirales, espinas y nervaduras en los moluscos

Derek E. Moulton, Alain Goriely y Régis Chirat

Ilustraciones de Bryan Christie Design

Derek E. Moulton es profesor asociado de biología matemática en la Universidad de Oxford.



Alain Goriely es profesor de modelización matemática en la Universidad de Oxford.

Régis Chirat es paleontólogo de la Universidad de Lyon especializado en moluscos fósiles.

Los moluscos son unos arquitectos fabulosos. Construyen casas que protegen sus blandos cuerpos de los depredadores y los elementos: caparazones de una dureza, belleza y duración poco corrientes. Muchos de ellos ostentan formas espectacularmente complejas, espirales logarítmicas ejecutadas con una regularidad matemática casi perfecta y adornadas con espinas fractales u otras filigranas. Sin embargo, los moluscos no saben nada de matemáticas. ¿Cómo, se preguntan los investigadores, generan estas humildes criaturas formas tan complejas con semejante precisión?

Desde hace más de cien años sabemos que las células, los tejidos y los órganos responden a las mismas fuerzas físicas que gobiernan otros tipos de materia. No obstante, la mayoría de los biólogos del siglo xx se centraron en estudiar la manera en que la genética dirige la formación de patrones biológicos y en averiguar cómo funcionan estos. En las últimas décadas, sin embargo, los investigadores han comenzado a usar modelos matemáticos basados en la física para esclarecer cuestiones relativas a la forma en biología. En esta línea, nuestros propios trabajos han aportado nuevas y apasionantes ideas sobre el modo en que las conchas adquieren sus adornadas estructuras.

Por medio de las herramientas que ofrece la geometría diferencial, una disciplina matemática que estudia las curvas y las superficies, hemos determinado que las elaboradas formas de las conchas de los moluscos surgen a partir de unas pocas reglas simples que estos animales siguen al construir sus hogares. A estas reglas hay que añadir las fuerzas mecánicas que se producen durante el crecimiento de la concha, lo que genera innumerables variaciones de los patrones. Nuestros hallazgos ayudan a explicar cómo características tan abarrocadas como las espinas han evolucionado de forma independiente en tantos linajes de gasterópodos o univalvos, los cuales constituyen el mayor grupo de moluscos. Estas criaturas no necesitan sufrir los mismos cambios genéticos para adquirir ornamentos similares: las leyes de la física hacen la mayor parte de la labor.

REGLAS DE CONSTRUCCIÓN

De construir la concha se encarga el manto del molusco. Este órgano, delgado y blanco, secreta en la apertura o estoma de la concha, capa a capa, una sustancia rica en carbonato de calcio. Solo necesita seguir tres reglas básicas para formar la característica espiral que vemos en los caracoles y sus parientes gasterópodos. La primera es expandir: al depositar cada vez más material que en el paso anterior, el animal crea una apertura un poco mayor en cada iteración, un proceso que tiende a generar un cono a partir de un círculo inicial. La segunda regla es rotar: esto se logra depositando un poco más de material en un lado de la apertura que en el opuesto, con lo que el molusco va generando poco a poco una figura con forma de rosquilla, o toro. La tercera regla es retorcer: el animal va girando los puntos donde deposita el material. Si solo tienen lugar la expansión y la rotación, obtendremos una concha en espiral plana, como la

Continúa en la página 66

EN SÍNTESIS

Los moluscos construyen sus complejos caparazones con precisión matemática.

Los modelos matemáticos revelan que estas criaturas solo han de seguir unas pocas reglas sencillas para producir esas elaboradas formas.

Estos hallazgos permiten dilucidar cuántas especies de moluscos no emparentadas han generado de manera independiente conchas con formas similares a lo largo de la evolución.

PÁGINAS ANTERIORES: NICK VEASEY, GETTY IMAGES; PÁGINA OPUESTA: BEN BRAIN, GETTY IMAGES (*Nautilus*); NICK VEASEY, GETTY IMAGES (*Turritella communis*)

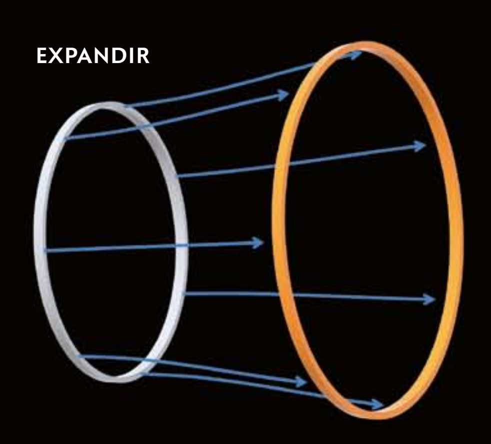
Espirales

Los moluscos siguen unas pocas reglas sencillas para crear conchas en espiral. La primera es expandir: el animal secreta capas sucesivas de material en la boca de la concha y, a medida que crece, deposita más material, creando así una apertura cada vez mayor. La segunda regla es rotar: al depositar un poco más de material en un lado de la apertura, los moluscos van construyendo una configuración con forma de rosquilla, o toro, a partir de lo que inicialmente era un círculo. La tercera regla es retorcer: el molusco gira los puntos en los que deposita el material. Diferentes combinaciones de estas tres reglas producen espirales con formas distintas.

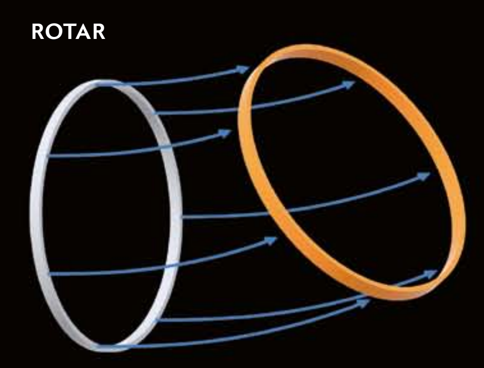
EXPANDIR Y ROTAR
Nautilus

EXPANDIR, ROTAR Y RETORCER
Turritella communis

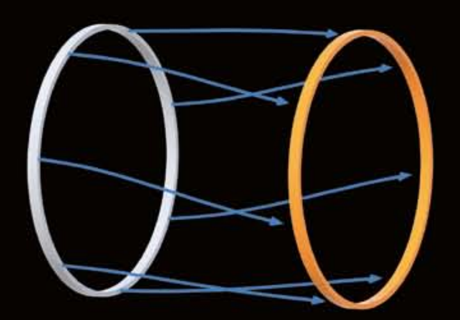
EXPANDIR



ROTAR



RETORCER



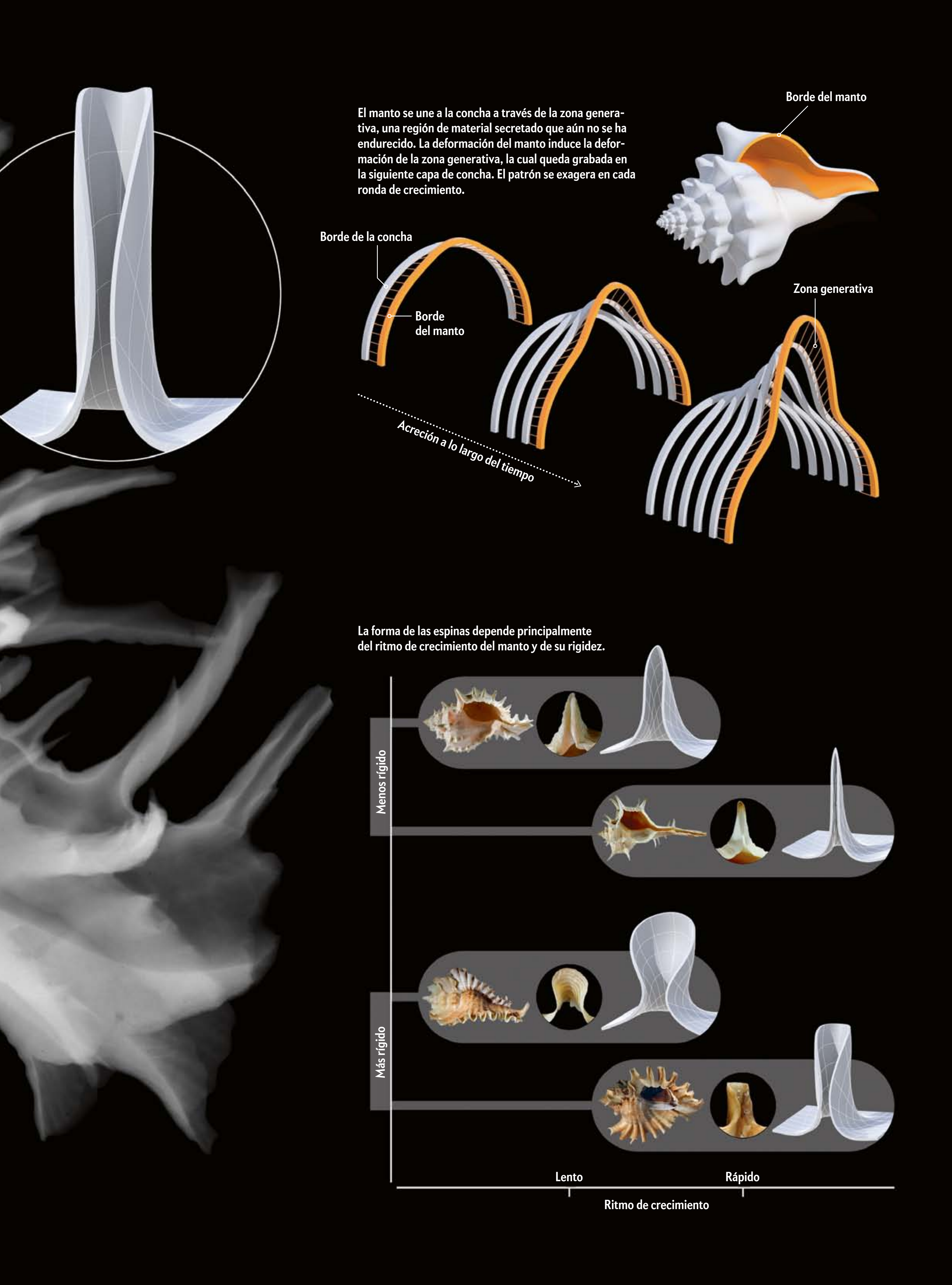
Espinas

Un órgano llamado manto es el que secreta la sustancia que acaba convirtiéndose en concha. Las espinas se forman en intervalos regulares durante los brotes de crecimiento del manto, cuando el órgano se expande tan deprisa que pierde la alineación con la apertura. Esta falta de coincidencia hace que el manto se abarquille ligeramente, por lo que el material que desprende adopta una forma combada. En cada ronda de crecimiento del manto, con el subsiguiente conflicto mecánico con la apertura, se amplifica el patrón arqueado.



Bolinus brandaris

NICK VEASEY, GETTY IMAGES


El manto se une a la concha a través de la zona generativa, una región de material secretado que aún no se ha endurecido. La deformación del manto induce la deformación de la zona generativa, la cual queda grabada en la siguiente capa de concha. El patrón se exagera en cada ronda de crecimiento.
Borde del manto
Borde de la concha
Borde
del manto
Zona generativa
Acreción a lo largo del tiempo
La forma de las espinas depende principalmente del ritmo de crecimiento del manto y de su rigidez.
Menos rígido
Más rígido
Lento
Rápido
Ritmo de crecimiento

Nervaduras

Los caparazones de amonites, un grupo de moluscos extintos, exhiben nervaduras regulares paralelas al borde de la concha. Los modelos matemáticos indican que este patrón ornamental es el producto de las fuerzas opuestas del manto y la zona generativa, las cuales dan lugar a un sistema oscilatorio de tensión y compresión. La expansión lenta de la apertura del molusco conduce a nervaduras densas (*izquierda*), mientras que la expansión rápida genera conchas lisas (*derecha*).



Viene de la página 62

de los nautilos. Si añadimos la torsión, el resultado es lo que los matemáticos llaman una concha helicoespiral no plana.

Para algunos constructores de conchas ese es el final de la historia: un hogar tan elegante y de líneas tan fluidas como el que cualquiera podría desear. Otros, sin embargo, requieren algunos adornos más para que todo esté en orden. Si queremos entender cómo se forman estos ornamentos, como las espinas, habremos de examinar las fuerzas que se producen durante el crecimiento del caparazón.

El proceso de secreción de la concha gira en torno a un interesante sistema mecánico. El manto está unido al caparazón a través de la llamada zona generativa, una región de material secretado pero aún sin calcificar. Es esta interacción entre el manto y la concha lo que posibilita la formación de patrones. Cualquier desajuste entre el manto y la apertura generará una tensión física en el tejido del manto. Si el manto es demasiado pequeño para la apertura, tendrá que estirarse para unirse a ella. Si es demasiado grande, tendrá que comprimirse para ajustarse. Y si la zona generativa se deforma por estas tensiones, el nuevo material que secrete el manto en esa etapa adoptará la configuración deformada, se solidificará en la concha e influirá durante el siguiente paso del proceso de crecimiento. En esencia, si la concha no crece exactamente a la misma velocidad que el molusco, surgirán deformaciones, las cuales generarán características que reconoceremos como adornos.

Las espinas constituyen la ornamentación más prominente. Sobresalen de ordinario en ángulo recto con respecto a la apertura de la concha y, a menudo, se extienden unos centímetros más allá de la superficie de esta. Estas proyecciones se forman en períodos regulares en los que el manto está sometido a brotes

de crecimiento. Durante esos períodos, el manto se desarrolla tan rápido que presenta un exceso de longitud, por lo que puede desalinearse con la apertura. Esta falta de coincidencia hace que el manto se doble ligeramente, con lo que el material secretado toma esa forma combada. Con el siguiente incremento, el manto habrá crecido más y excederá nuevamente la apertura, lo que tiene el efecto de amplificar el patrón arqueado.

Al analizar el fenómeno, supusimos que ese proceso repetido de crecimiento e interacción mecánica daría lugar a una fila de espinas, cuyo patrón preciso estaría determinado principalmente por el ritmo del crecimiento y por la rigidez del manto. Para poner a prueba esta idea, desarrollamos un modelo matemático de un manto que crecía sobre una base que evolucionaba en cada iteración. Al ensayar con parámetros de crecimiento y propiedades del material típicos, emergió una amplia variedad de patrones de espinas, similares a las formas que se observan en conchas reales. Ello confirmó nuestra hipótesis.

UNA CASA ANTIGUA

Las espinas no son la única floritura que los moluscos pueden agregar a sus conchas. Otro tipo de ornato se encuentra en las conchas de amonites, un grupo de moluscos extintos relacionados con los cefalópodos actuales (nautilos, pulpos y sus primos). Los amonites dominaron los mares durante 335 millones de años antes de desaparecer hace alrededor de 65 millones de años. La abundancia de sus restos fosilizados, junto con su gran diversidad de formas y el alto ritmo evolutivo que parecen tener, los ha convertido en uno de los grupos de fósiles más estudiados.

La característica más llamativa del caparazón del amonite, más allá de su forma espiral logarítmica plana, es la nervadura regular paralela al borde de la concha. Esta ornamentación probablemente se originase por el mismo conflicto mecánico que produce las espinas; sin embargo, el resultado es un patrón completamente distinto. Las fuerzas en liza son las mismas, pero no así la magnitud y la geometría sobre la que operan.

La apertura del amonite es básicamente circular. Si en un momento dado el radio del manto es más grande que el de la apertura, el manto se comprimirá, aunque no lo suficiente como para generar el grado de inestabilidad elástica necesario para producir espinas. Lo que hará el manto comprimido será empujar hacia afuera, y el radio de la apertura de la concha se hará más grande en el siguiente incremento. Pero este movimiento hacia fuera se opondrá al de la zona generativa calcificadora, que actuará como un resorte de torsión que trata de mantener la orientación de la concha.

Nuestra conjetura era que el efecto de estas dos fuerzas opuestas actuaría como un sistema oscilatorio: el radio de la concha aumenta, lo que reduce la compresión; pero lo hace en exceso, dando lugar a un estado de tensión. El manto «estirado» empuja entonces hacia el interior para que disminuya la fuerza que lo tensa; sin embargo, lo hace de nuevo en exceso, de modo que sea crea un estado de compresión. Una descripción matemática de este «oscilador morfomecánico» confirmó nuestra hipótesis: produjo nervaduras regulares con una longitud de onda y una amplitud que aumentaban durante el crecimiento y el desarrollo del molusco. Estas predicciones matemáticas se asemejan en gran medida a las formas conocidas de los amonites.

Los modelos matemáticos también predicen que, cuanto mayor sea el ritmo de expansión del molusco en crecimiento (la velocidad a la que el diámetro de la apertura de la concha aumenta), menos pronunciadas serán sus nervaduras. Estos hallazgos ayudan a explicar la observación empírica de que un aumento en la curvatura de la apertura se correlaciona con un aumento del patrón de nervaduras, una tendencia evolutiva que los paleontólogos conocen bien desde hace más de un siglo.

Esta relación entre velocidad de expansión y nervaduras también proporciona una sencilla explicación mecánica y geométrica a un viejo rompecabezas relativo a la evolución de los moluscos: las conchas y sus compartimentos internos de *Nautilus pompilius* y sus parientes, un grupo conocido como los nautilinos, se han mantenido prácticamente lisas desde hace al menos 200 millones de años, lo que ha llevado a algunos a señalar que el grupo no parece haber evolucionado en ese tiempo. De hecho, las pocas especies de nautilinos que todavía sobreviven se describen a menudo como «fósiles vivientes». Nuestro modelo biofísico de crecimiento, sin embargo, muestra que la lisura de las conchas de los nautilinos es meramente una consecuencia mecánica de una rápida expansión de la apertura. Este linaje puede haber evolucionado más de lo que la morfología de sus conchas sugiere, pero al carecer de los patrones ornamentales distintivos que los paleontólogos utilizan para diferenciar especies, su evolución real permanece oculta en gran medida.

Todavía nos queda mucho por aprender sobre el modo en que los moluscos construyen sus maravillosas moradas. Un vistazo a cualquier buena colección de conchas revela una serie de patrones que los científicos aún no han sido capaces de explicar. Por ejemplo, aproximadamente el 90 por ciento de los gasterópodos son «diestros»; es decir, construyen sus conchas de manera que se enrollan en el sentido de las agujas del reloj. Solo el 10 por ciento lo hace en sentido antihorario. Apenas si se han empezado a proponer posibles mecanismos que expliquen esta prevalencia. Los orígenes de algunas exquisitas ornamentaciones son igualmente desconocidos, como el patrón cuasifractal de espinas encontrado en una serie de especies de la familia de moluscos *Muricidae*. Además, aunque sabemos que los factores ambientales influyen en el ritmo de crecimiento de las conchas, la manera en que tales variables afectan a su forma está menos claro.

La resolución de estos y otros misterios relacionados con las conchas marinas —organismos modelo para explorar cuestiones más amplias sobre la formación de patrones en la naturaleza— aún nos dará trabajo. Pero entender las fuerzas físicas que gobiernan su desarrollo solo aumenta la fascinación que sentimos por ellos.

PARA SABER MÁS

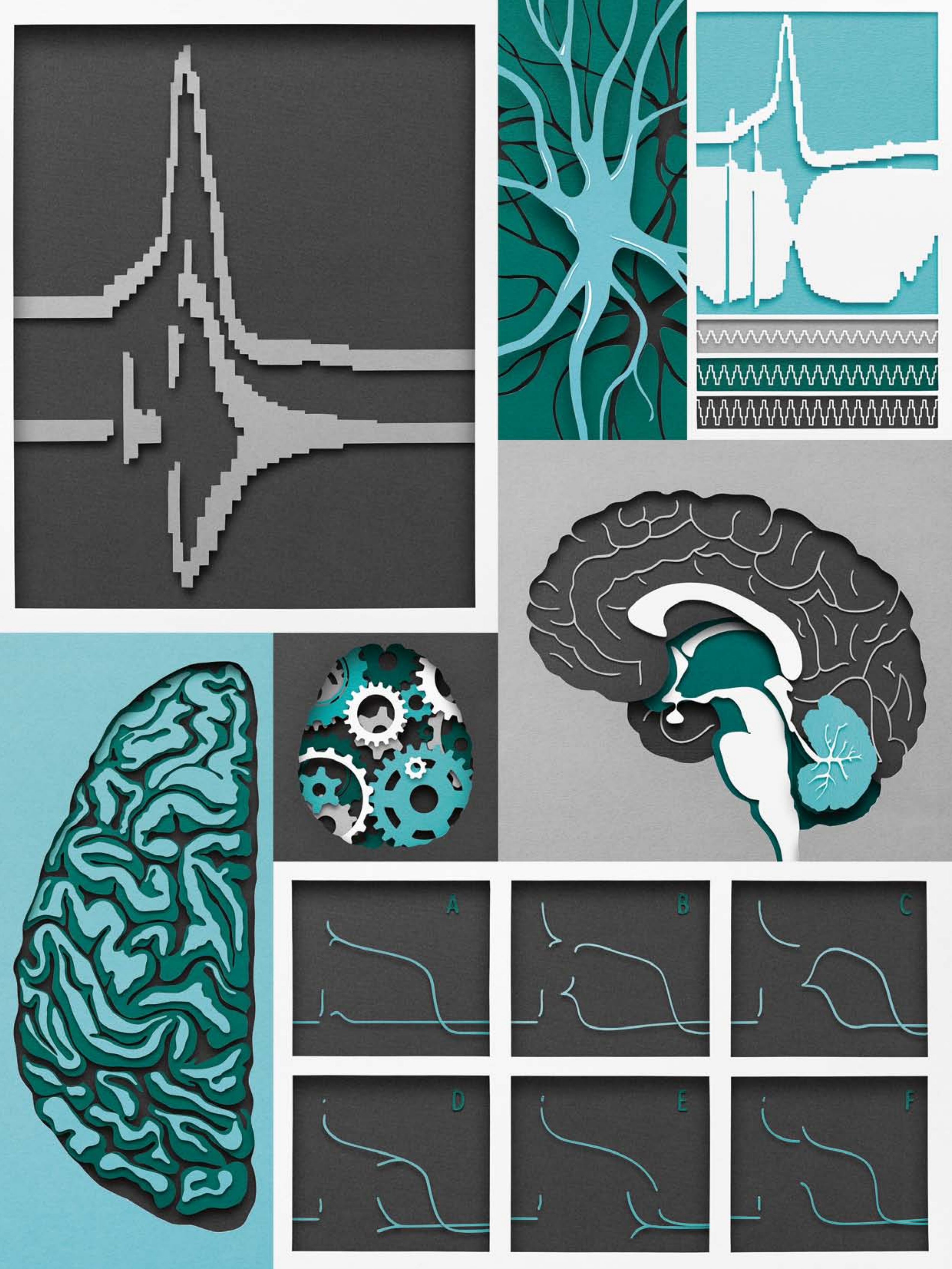
Mechanical basis of morphogenesis and convergent evolution of spiny seashells. Régis Chirat, Derek E. Moulton y Alain Goriely en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 110, n.º 15, págs. 6015-6020, abril de 2013.

Morphomechanics and developmental constraints in the evolution of ammonites shell form. Alexander Erlich et al. en *Journal of Experimental Zoology, Part B: Molecular and Developmental Evolution*, vol. 326, n.º 7, págs. 437-450, noviembre de 2016.

The mathematics and mechanics of biological growth. Alain Goriely. Springer Verlag, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Espirales de cera. H. Joachim Schlichting en *IyC*, noviembre de 2016.


A
B
C
D
E
F

NEUROCIENCIA

EL IMPULSO NERVIOSO, reimaginado

Unos físicos que han reproducido experimentos de hace medio siglo aseguran que las neuronas no se comunican mediante impulsos eléctricos, sino mecánicos

Douglas Fox

OWEN GILDERSLEEVE

Douglas Fox, escritor especializado en ciencias de la vida, hace hincapié en temas de neurociencia y climas extremos.



En la habitación de un hospital de Copenhague, una joven yace tumbada en una camilla. Mantiene el brazo izquierdo extendido, con varios electrodos conectados a él. Cada pocos segundos, un chasquido resuena en el aire: una descarga eléctrica. Y cada vez que eso sucede, los dedos se le contraen involuntariamente y el rostro se le crispa. Al acabar el día habrá recibido cientos de ellas.

La mujer, a la que atienden varios médicos ataviados con batas, está cediendo el brazo por 1000 coronas danesas, unos 135 euros. Thomas Heimburg, formado en biofísica y mecánica cuántica, se halla sentado en un taburete a una distancia prudencial, bosquejando en su iPad los detalles de un crudo experimento del cual espera resultados trascendentes.

Los facultativos han inyectado a la mujer un anestésico local, lidocaína, a una dosis que le insensibiliza el miembro. Al principio los nervios no responden a las descargas, pero los asistentes aumentan gradualmente la intensidad. Ahora las sacudidas alcanzan los 40 miliamperios, casi diez veces el valor inicial, similar a la corriente que circula por una bombilla de cinco vatios.

¡Zas! Otra descarga. La mano se retuerce como una serpiente moribunda. Heimburg, con la vista fija en un monitor de la pared, no presta atención a ella. En la pantalla, una onda que representa la señal eléctrica en los músculos y los nervios del brazo exhibe un pronunciado pico, lo cual indica que las descargas, en progresivo aumento, han empezado a sobrepasar el efecto de la anestesia. El nervio está emitiendo ahora impulsos con tanta fuerza como antes de inyectar la lidocaína. Heimburg parece complacido. «Esto pone en entredicho todo lo escrito en los libros», afirma con voz serena.

Miembro del Instituto Niels Bohr de Copenhague, institución célebre por sus investigaciones en física, Heimburg abriga la esperanza de poder rebatir buena parte de lo que recogen los libros. Yo mismo presencié en diciembre de 2011 el experimento descrito, concebido para investigar un misterio médico que se remonta muchos años atrás.

Los anestésicos generales se llevan aplicando en medicina 170 años y hoy se conocen docenas. Si se eleva poco a poco la dosis, todos silencian las funciones nerviosas del cuerpo y del cerebro en un orden definido: primero la creación de los recuerdos, luego la sensación de dolor, después la consciencia y, por último, la respiración. Ese mismo orden se repite en todos los animales, desde el ser humano hasta la mosca.

Pero hasta hoy nadie sabe cómo opera realmente la anestesia. El óxido nitroso, el éter, el sevoflurano y el xenón poseen estructuras moleculares tan dispares que a primera vista parecería improbable que ejercieran los mismos efectos uniéndose a proteínas similares de las células, como ocurre con otros medicamentos.

Nuestro protagonista piensa que los anestésicos actúan de una manera radicalmente distinta: modifican las propiedades mecánicas del nervio. De confirmarse esta conjetura, significaría que las neuronas del cerebro y del resto del cuerpo son en realidad ingenios mecánicos y no los circuitos eléctricos que damos por hecho desde hace decenios. A su juicio, los impulsos eléctricos son el mero efecto secundario de una onda de choque física que se propaga a lo largo del nervio, a semejanza de cómo se desplazan las ondas de sonido. Heimburg supone que los anestésicos silencian los nervios impregnando y ablandando las membranas grasas que recubren las fibras nerviosas, de modo que no transmitirían las ondas de choque, como una cuerda de guitarra demasiado floja para vibrar.

Como testigo del experimento, me sentí tentado a no tomarle en serio. Pero en los siete años transcurridos, este físico y sus colaboradores han desplegado un abanico de pruebas que ha empezado a suscitar el interés de otros: mediciones sumamente precisas del desplazamiento de las ondas mecánicas a través de las neuronas y de cuánto y con qué rapidez se dilatan y contraen las membranas, así como otros estudios que muestran cómo alteran los anestésicos tales propiedades. Ahora, Heimburg prepara un experimento crucial que podría afianzar su postura: pretende medir el calor emitido por una sola neurona cuando la atraviesa un impulso.

Su trabajo continúa demostrando que la complejidad de las señales nerviosas es mayor de lo que buena parte de los científicos advierten. Cabe la posibilidad de que los componentes mecánicos hayan pasado inadvertidos por uno de esos accidentes de la historia: hace medio siglo, los instrumentos de laboratorio medían con facilidad los débiles impulsos eléctricos de las neuro-

EN SÍNTESIS

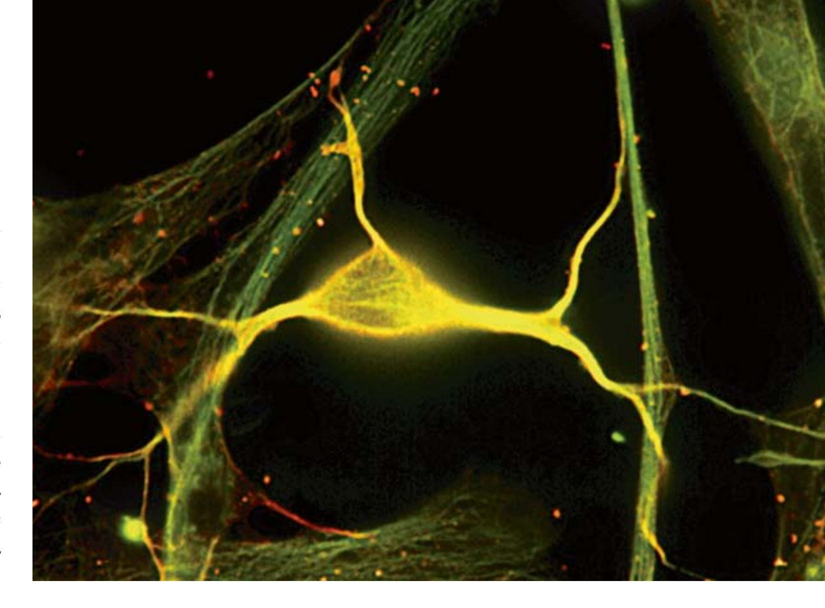
El físico Thomas Heimburg podría trastocar la biología al afirmar que los nervios no generan impulsos eléctricos sino mecánicos. Para demostrarlo, reproduce experimentos de hace 50 años concebidos por un neurocientífico cuya teoría se descartó.

Defiende la idea de que las señales emitidas por las fibras nerviosas son ondas de compresión, como las sonoras, que alteran momentáneamente las membranas grasas que las recubren, que pasan del estado fluido al cristalino.

Los biólogos creen que Heimburg solo expone los efectos secundarios del impulso eléctrico, si bien algunos reconocen que ambos fenómenos podrían actuar a la vez, lo que obligaría a reformular las explicaciones sobre cómo opera el cerebro.

nas, pero no los mecánicos. Esas limitaciones condicionaban los descubrimientos y las ideas que se incorporaban al pensamiento dominante. Los experimentos en curso de Heimburg podrían reabrir un cisma científico con décadas de antigüedad.

El caso de la neurona mecánica encierra lecciones sobre sesgos y accidentes de la historia que son aplicables a todas las ramas de la ciencia. Podría, además, cambiar nuestra comprensión básica de los nervios, el cerebro y la inteligencia. Los expertos se afanan por explicar cómo el cerebro es capaz de lograr hazañas tan asombrosas como el reconocimiento facial y el habla a pesar de depender de unas proteínas neuronales que son eléctricamente ruidosas y poco fiables. Heimburg está enseñando que las ondas mecánicas permiten compensar ese ruido. Si su hipótesis quedara demostrada, podría reescribir la biología. O, sencillamente, quizá se equivoque.



LAS NEURONAS del hipocampo (*amarillo*), el centro de la memoria a largo plazo, están sostenidas por proteínas (*verde y rojo*).

ROBERT S. McNEIL, SCIENCE SOURCE

NERVIOS CALIENTES

El impulso neuronal que tanto tiempo ha resistido al escrutinio dura un instante. Si pisa una chincheta, el cerebro percibe el dolor en una fracción de segundo. La señal viaja por las fibras nerviosas a velocidades de hasta 30 metros por segundo.

Las fibras se asemejan a minúsculas tuberías huecas, más delgadas que un cabello. La pared de ese conducto la conforma una membrana celular aceitosa, flanqueada a ambos lados por átomos dispersos de sodio y potasio con carga eléctrica, llamados iones. A mediados del siglo xx, los investigadores aprendieron a insertar electrodos en las neuronas para medir el voltaje en la pared de la membrana. Así descubrieron que cuando un impulso nervioso se transmite por la membrana y pasa por el electrodo, el voltaje se eleva abruptamente durante unas milésimas de segundo. En 1952, dos británicos, Alan Hodgkin y Andrew Huxley, plantearon que el pico se genera cuando los iones de sodio fluyen desde el exterior de la membrana hacia el interior. El voltaje recupera su valor normal cuando los iones de potasio atraviesan la pared en sentido inverso. El modelo de Hodgkin-Huxley fundó los cimientos de la neurofisiología moderna.

Ambos recibieron el premio Nobel en 1963. Aun así, algunos siguieron señalando observaciones que socavaban el modelo, objeciones que Heimburg ha recreado pese a que varias se desestimaron por erróneas.

Uno de aquellos disidentes fue Ichiji Tasaki, durante muchos años neurobiólogo de los Institutos Nacionales de la Salud de EE.UU. (NIH, por sus siglas en inglés). En 1979 dirigió un experimento poco ortodoxo. Sirviéndose de un microscopio, colocó primorosamente una partícula de platino brillante encima de una fina hebra blanca —un haz de fibras nerviosas de cangrejo, expuestas al disecar una de sus patas— y enfocó un láser sobre el metal. Midiendo el reflejo de la luz, podría detectar movimientos que delatarían si el haz de nervios se dilataba o se encogía cuando lo recorría un impulso eléctrico. Junto con Kunihiko Iwasa, por entonces investigador posdoctoral, hizo cientos de medidas. Al cabo de una semana, la respuesta parecía clara: cada vez que un impulso atravesaba las fibras nerviosas, estas se dilataban durante un instante y luego, en cuestión de milisegundos, volvían a encogerse.

La ondulación era minúscula: la superficie de la membrana apenas se elevaba unas siete millonésimas de milímetro. Pero coincidía perfectamente con el impulso eléctrico circulante, lo cual confirmaba una sospecha que Tasaki había abrigado durante años: que Hodgkin y Huxley andaban errados.

Ya en los años cuarenta del siglo xx, los investigadores se habían percatado de que, cuando un impulso eléctrico se propaga por una fibra nerviosa, la célula, translúcida, se vuelve momentáneamente más opaca. En 1968, Tasaki y otro equipo hallaron indicios de que las moléculas de la membrana se reorganizan cuando llega un impulso, y una vez que este pasa, recuperan su conformación original.

A ello debía sumarse la cuestión del calor. Era previsible que el impulso eléctrico liberara calor, una consecuencia normal del paso de la corriente. Pero varios equipos descubrieron algo extraño. La temperatura de la fibra nerviosa aumentaba varias millonésimas de grado, pero volvía a caer rápidamente una vez desaparecido el impulso. El calor no se disipaba, sino que el nervio reabsorbía la mayor parte, también en milésimas de segundo.

Para Tasaki, la dilatación transitoria, el reordenamiento de las moléculas y el calentamiento y posterior enfriamiento apuntaban a una conclusión asombrosa: la señal nerviosa no solo consistía en un impulso eléctrico; era a la vez un impulso mecánico. Todos aquellos que sondeaban los nervios con electrodos estaban perdiendo de vista buena parte de la acción.

Tasaki dedicaría el resto de su vida a explorar esos efectos. Llegó a creer que no se originaban en la membrana celular, sino en una capa de filamentos de proteína y glúcidos situada justo debajo de ella. Según su teoría, cuando llega un impulso eléctrico, estos filamentos absorben iones de potasio y agua —lo cual provoca su dilatación y calentamiento—, un proceso que se revierte tras la desaparición del impulso.

A medida que se internaba por esa vía, Tasaki poco a poco empezó a apartarse de las tendencias en el campo. Otros factores conspiraban en su contra. Habiendo crecido en Japón, hablaba un inglés forzado. «Uno tenía que saber muchas cosas para mantener una conversación sustanciosa con él», comenta Peter Basser, director de la sección de neurociencias de los NIH, que conoció a Tasaki durante 20 años. «Tengo la impresión de que mucha gente lo tomaba por una persona menos profunda y perspicaz de lo que en realidad era.» Además, si bien colaboró con científicos visitantes, no tuvo a su cargo a ningún estudiante que pudiera llevar adelante sus ideas.

Un aspecto emblemático del cisma quedó reflejado en la rivalidad ideológica que surgió entre Tasaki y otro ilustre neurocientífico de los NIH, Kenneth Cole, partidario de la corriente dominante. Aunque ambos trabajaron en el mismo edificio de laboratorios entre las décadas de los cincuenta y setenta, apenas se dirigieron la palabra durante quince años, excepto en las pre-

sentaciones públicas, donde uno desautorizaba al otro poniéndose de pie en la sala y formulando preguntas espinosas.

Con motivo de una reestructuración de los NIH en 1997, Tasaki renunció a su laboratorio y acabó instalado en un rincón del de Basser. Siguió trabajando los siete días de la semana hasta bien entrada la novena década de vida. Un día de diciembre de 2008, mientras paseaba cerca de casa, perdió el equilibrio con tan mala fortuna que se golpeó la cabeza contra el suelo. Fallecería una semana más tarde a los 98 años.

Para entonces, su trabajo había quedado relegado al olvido. «No creo que nadie dudase de que esos fenómenos que observaba fueran ciertos, pues se le respetaba en el laboratorio», afirma Adrian Parsegian, biofísico de la Universidad de Massachusetts en Amherst y miembro de los NIH de 1967 a 2009. Más bien, sus hallazgos «se desecharon por no ser primordiales» para la transmisión de las señales nerviosas; se consideraron meros efectos secundarios de los impulsos eléctricos. Las incógnitas subyacentes «no se resolvieron. Una de las posturas acabó en los libros de texto y la otra no», añade.

LÍQUIDOS GRASOS QUE SE TORNAN CRISTALES

Heimburg se topó con los estudios de Tasaki a mediados de los años ochenta, mientras cursaba el doctorado en el Instituto Max Planck de Química Biofísica en Gotinga. Pronto empezó a pasar largas jornadas en la biblioteca, enfrascado en el estudio de viejos artículos, hasta que acabó encajando las piezas de modo distinto al planteado por Tasaki. Supuso que la onda mecánica, los cambios ópticos y el calor transitorio debían ocurrir en la membrana celular lipídica de los nervios que se extienden por el cuerpo y el cerebro, no en los filamentos de proteínas y glúcidos ubicados bajo la membrana, como había supuesto su antecesor.

A finales de los años noventa, Heimburg había iniciado una serie de experimentos propios en los que comprimía membranas celulares artificiales para averiguar cómo responderían a una onda de choque mecánica. Ese trabajo reveló un hecho crucial: los lípidos de la membrana permanecen normalmente en estado fluido, con sus moléculas orientadas al azar, pero rondan cerca de lo que los químicos denominan «transición de fase». Si se aprieta un poco la membrana, los lípidos se condensan formando un cristal líquido casi perfectamente alineado.

Estos resultados animaron a Heimburg a postular que el impulso nervioso es una onda de choque mecánica que recorre la membrana del nervio. A medida que avanza, comprimiría las moléculas de lípidos, que formarían un cristal líquido y con ello se liberaría una pequeña cantidad de calor a consecuencia del cambio de fase, igual que cuando se congela el agua. Luego, unas milésimas de segundo después de que la cola de la onda de choque haya pasado, la membrana recuperará su estado fluido, reabsorbiendo el calor. Esa breve transición de una fase a otra explicaría asimismo la breve dilatación de la membrana que Tasaki e Iwasa habían observado al iluminar con un láser aquella partícula de platino.

Los experimentos de Heimburg dieron un paso más. Mostraban cómo podrían estar vinculadas la onda de choque y la transición de fase con el pico de voltaje que surge durante la propagación del impulso. Descubrió que podía conferir a la membrana su estado de cristal líquido sometiéndola a cierto voltaje. «La gente se ha pasado 70 años aplicando voltajes a través de las membranas biológicas, pero ninguno de esos electrofisiólogos había comprobado» si se formaba una estructura de cristal líquido, señala.

Los diagramas de los libros representan las membranas celulares como láminas pasivas y delgadas que aíslan y envuelven fibras nerviosas con forma cilíndrica. Ahora los físicos han empezado a percatarse de sus sorprendentes propiedades. Pertenecen a un tipo de materiales llamados piezoeléctricos, capaces de transformar la fuerza mecánica en eléctrica, y viceversa; los relojes de cuarzo operan según ese principio. Ello implica que todo impulso eléctrico que se transmita por la membrana llevará asociado una onda mecánica. Y a la inversa: toda onda mecánica que se desplace por ella se expresará como un impulso eléctrico.

Cuando, en 2005, Heimburg, junto con Andrew D. Jackson, publicaron por vez primera esta teoría, aún no habían observado ninguno de esos impulsos electromecánicos en movimiento. Un antiguo alumno de Heimburg llenó esa laguna. En 2009, el biofísico Matthias Schneider, hoy en la Universidad Politécnica de Dortmund, describió que podía generar una onda mecánica aplicando tensión a una membrana artificial, con una intensidad similar a la detectada en las neuronas. La onda de choque se propagaba a unos 50 metros por segundo, similar a la velocidad con que las señales provocadas por el pinchazo con una chincheta llegan al cerebro desde el pie. En 2012, Schneider confirmó que los impulsos mecánicos y eléctricos eran parte de la misma onda de membrana.

No obstante, su hallazgo más importante acaeció en 2014. Un atributo fundamental de los impulsos nerviosos es que son de tipo «todo o nada». Si una neurona recibe un estímulo débil, no desatará un potencial de acción; solo lo hará si aquel es lo bastante fuerte. «Existe un umbral», explica Schneider, quien descubrió que las ondas electromecánicas de sus membranas artificiales eran de ese mismo tipo: «todo o nada». El factor determinante parece radicar en si se ejerce suficiente presión sobre la membrana para que esta adquiera el estado de cristal líquido. Solo entonces, concluye, «se genera el impulso».

ANESTESIA EXPLICADA

¿Por qué razón había adoptado Heimburg esa idea en los nervios y la anestesia? Con el deseo de averiguarlo, la misma semana en que asistí al experimento del hospital, acudí a su despacho del Instituto Niels Bohr.

Las estanterías de Heimburg parecen más propias de un físico que de un biólogo; están colmadas de tomos de autores alemanes ya fallecidos. Entre ellos destaca una hilera de libros de Hermann von Helmholtz, quien a mediados del siglo XIX formuló una premisa esencial de la termodinámica: la energía puede transformarse, pero ni se crea ni se destruye. Helmholtz, casualmente, también midió la velocidad de los impulsos nerviosos. «Tendría que ser obligatorio leer estos textos antiguos», opina. En ellos se plasma el descubrimiento gradual de los vínculos fundamentales entre energía, temperatura, presión, voltaje y transiciones de fase. Estos principios subyacen a las ideas de Heimburg acerca de la función nerviosa, las ideas de un físico que intenta abrirse paso en otro campo. «La termodinámica es la ciencia más profunda que poseemos. Una persona que sepa de termodinámica es una persona sabia», declara.

No tarda en señalar las incongruencias de las explicaciones ortodoxas acerca de la anestesia. Los biólogos piensan que los anestésicos acallan los nervios uniéndose a los canales iónicos —válvulas ubicadas en la membrana nerviosa que se abren y cierran para dar paso a iones de calcio o de potasio a través de ella—, que quedan bloqueados. Afirman que el flujo de iones provoca que los impulsos eléctricos se propaguen a lo largo de las fibras nerviosas, lo que se suele representar como una señal eléctrica. Ahora

¿Cómo envían señales los nervios?

Desde hace décadas, el proceso con el que las neuronas transmiten sus señales por el cerebro y el cuerpo cuenta con una explicación ortodoxa: cada mensaje es transmitido como un impulso eléctrico que se propaga por el largo axón de cada neurona hasta saltar a la siguiente. Pero ahora un puñado de físicos, que han realizado exóticos ensayos en neuronas en acción, aseguran que esas señales son en realidad impulsos mecánicos que se propagan a lo largo del axón, con un movimiento similar al de las ondas sonoras o sísmicas. Algunos investigadores aducen que cualquier impulso físico no es más que un efecto secundario del impulso eléctrico. La resolución de esta disputa podría llevar a revisar las explicaciones acerca de cómo funciona el cerebro.

Idea imperante: el impulso eléctrico

Según la idea clásica, la señal nerviosa se transmite por la membrana que conforma la pared exterior del axón, compuesta por moléculas de lípidos. Los canales presentes en esta capa lipídica se abren momentáneamente, lapso en que los iones de sodio y potasio (partículas con carga eléctrica) atraviesan la membrana, para después cerrarse en un instante. La apertura y el cierre de los canales alineados a lo largo del axón originan la propagación del impulso eléctrico.

Canal iónico abierto
Ion potasio
Ion sodio
Bicapa lipídica
Canal iónico cerrado
Interior del axón

Dirección de la señal
Axón
Neurona

Fluido
Cristal
Interior del axón
Fluido
Bicapa lipídica

Una nueva perspectiva: la onda mecánica

En la nueva hipótesis propuesta, las señales nerviosas también se transmiten por la membrana del axón, pero como una onda de choque que lo recorre. En su avance, el frente de onda comprime las moléculas de los lípidos, con lo que modifica brevemente su estado de fluido a líquido cristalino y provoca su dilatación y que liberen calor. Una vez que la onda ha pasado, las moléculas recuperan su forma fluida, se encogen y reabsorben el calor.

FALCONIERI VISUALS

bien, a la vista de que los diversos anestésicos poseen estructuras moleculares tan dispares, a Heimburg le costaba creer que todos se unieran a los canales iónicos. Esa explicación era «completamente ridícula», sentencia, con un matiz de frustración, como recalcando algo que tendría que ser obvio. Debía de estar actuando algo «más profundo, más difícil de comprender».

Las ideas de Heimburg nacen en parte de un viejo volumen titulado *Studien über die Narkose* (*Estudios sobre la narcosis*), publicado por Ernest Overton en 1901. En él se relata un experimento que llamó la atención del físico. Overton seleccionó varias docenas de anestésicos e introdujo cada uno en matraces que contenían agua y, flotando en esta, una capa de aceite de oliva. A continuación, agitó cada matraz y, tras esperar a que el agua y el aceite volvieran a separarse, determinó qué fracción de cada sustancia permanecía en el aceite y qué fracción en el agua. Cuanto más potente era un anestésico en los animales, más se desplazaba hacia el aceite, un resultado sorprendente que más tarde fue confirmado en los anestésicos modernos. El aceite de oliva y las membranas celulares se componen del mismo tipo de lípidos: ácidos grasos. Heimburg conjeturó que el funcionamiento de las drogas quizá se debiera a que penetraban en las membranas celulares y alteraban sus propiedades físicas.

No se pone en duda la existencia de las ondas mecánicas, matiza uno de los neurocientíficos involucrados en la controversia. «La incógnita es si las neuronas realmente las aprovechan con algún fin.»

Los experimentos con membranas sintéticas parecen avalar esa idea. Cuando Heimburg inyecta un anestésico, este impide que la membrana se convierta en cristal líquido. Este fenómeno sucede porque reduce la temperatura (y aumenta la presión) a la que tiene lugar el cambio de fase de lípido fluido a lípido cristalino, del mismo modo que la sal o el azúcar rebajan el punto de congelación del agua.

Heimburg razonó que impedir esa transición en la membrana detendría el avance del impulso mecánico por la fibra nerviosa, lo que explicaría por qué los anestésicos insensibilizan los nervios. Y en especial predijo que debería ser posible vencer tal efecto. A fin de crear una presión elevada para solidificar la membrana por medio de una descarga eléctrica, se ha de aumentar la corriente, que es exactamente el procedimiento que los médicos ensayaban en el brazo de aquella mujer en el hospital danés. Y en efecto, las descargas eléctricas fuertes anulaban el anestésico. Además, el proceso debería ser reversible si, en vez de recurrir a la electricidad, se incrementara la presión física sobre la membrana.

Los biólogos demostraron esto en 1942. Emplearon dos anestésicos, el etanol y el uretano, para adormecer a renacuajos hasta el punto de que dejaran de nadar. Acto seguido, los introdujeron en una cámara hiperbárica y elevaron la presión hasta 136 veces la atmosférica. El efecto anestésico se desvaneció: volvieron a nadar como si nada. Y cuando se redujo la presión, quedaron de nuevo inmóviles. «Es asombroso», comenta Heimburg con una sonrisa. «¿Cómo se le ocurre a alguien someter a presión hiperbárica a un puñado de renacuajos ebrios?».

SIN TOLERANCIA PARA EL DEBATE

Hoy por hoy, Heimburg se siente frustrado por la reacción de los biólogos a sus planteamientos, que él engloba bajo el nombre de «teoría del solitón» (un solitón es una onda autosostenida que se propaga sin deformarse). Ha encontrado oposición desde que, en el año 2005, se publicara en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, pese a la gran reputación de la revista.

Catherine Morris, destacada neurobióloga emérita del Instituto de Investigación del Hospital de Ottawa, se muestra muy crítica; en sus palabras, todo el trabajo destila el maloliente aire de superioridad de un físico que piensa que puede irrumpir como si nada en otra disciplina y corregir a la gente. Lo resumió con una de sus metáforas favoritas: «Me da la impresión de que es algo típico de los físicos, como decir: “Supongamos una vaca esférica...”».

La reacción de Morris resulta hasta cierto punto comprensible. Una cosa es afirmar que los nervios son mecánicos, además de eléctricos, y otra muy distinta es rechazar, como hacen Heimburg y Schneider, el concepto de que los canales iónicos cumplen una función importante en la conducción del impulso nervioso, lo cual constituye la mayor y más problemática desviación de la corriente dominante en biología. No parece importar que se hayan descubierto cientos de proteínas canaliculares. Ni que los flujos de iones puedan ser alterados selectivamente con ciertas sustancias. Ni que las mutaciones que somos capaces de producir en las proteínas cambien la forma en que se activan las neuronas. «Hacen alegremente caso omiso de los conocimientos de la biología», asegura Morris, que dedicó 30 años a estudiar las proteínas canaliculares.

Heimburg y Schneider admiten que esas proteínas han de cumplir alguna función. Pero apuntan a ensayos, algunos realizados por el primero, que muestran que los iones pueden atravesar las membranas artificiales aun en ausencia de tales proteínas. Este flujo lo achacan a la aparición de orificios pasajeros que surgen cuando la membrana transita entre las fases fluida y cristalina, y piensan que ocurre en los nervios del cuerpo y del cerebro.

Su escepticismo refleja una tendencia cultural en la física: la creencia de que cualquier fenómeno debería poder explicarse con principios termodinámicos; principios que, argumentan, los biólogos han descuidado por su obsesión con las proteínas. Un puritanismo similar habría propiciado que se descartara la teoría de Tasaki. «No le gustaba el término “canales iónicos”», me contó Iwasa cuando hablamos a finales de 2017. Esa actitud iconoclasta pudo conducir a Tasaki hasta hallazgos que otros no habrían logrado, añadió, «aunque es posible que más adelante le perjudicara».

Brian Salzberg, que estudia la física de los nervios en la Universidad de Pensilvania, está de acuerdo. Inició su carrera en neurociencia en 1971 y su camino se cruzó con el de Tasaki en varias ocasiones. «Era un investigador muy capaz y no me cabe duda de que midió cambios reales» en el grosor de los nervios, me dijo a inicios de año. «Pero los malinterpretó.» Salzberg indica que las fibras nerviosas se hinchan momentáneamente al paso del impulso eléctrico en parte porque las moléculas de agua penetran en la membrana a través de los mismos canales iónicos que permiten la entrada del sodio y luego son liberadas por los canales que posibilitan la salida del potasio. Si Tasaki hubiera aceptado la idea de los canales iónicos, quizá se habría mostrado receptivo a otras interpretaciones de la onda mecánica.

Pero existe otro factor de peso que habría contribuido a dejar al margen a Tasaki y que encierra una importante lección para todas las ciencias hoy en día.

IDEÓLOGOS

Resulta intrigante que la energía térmica desprendida por un nervio en plena descarga pueda duplicar la energía de la señal eléctrica que ha dominado la neurociencia. Las reticencias a tales características no eléctricas quizá se deban en parte a un capricho de la historia.

Tasaki, notable por su talento para fabricar instrumentos, se fogueó como científico en el Tokio de la Segunda Guerra Mundial. Ante la seria escasez de suministros, se las ingenió para montar su instrumental obteniendo componentes electrónicos de aquí y de allá. Años más tarde, ya en Estados Unidos, se valió de esa habilidad para construir artefactos primorosos, únicos en su género, que medían el calor, o la expansión momentánea, de las neuronas.

Ni los aparatos ni su pericia y sus conocimientos llegaron a otros científicos. En cambio, la medición de la señal nerviosa eléctrica siguió un camino distinto: se concibieron métodos que podían transferirse con facilidad, como la inserción de electrodos diminutos en la membrana celular. Conforme tales técnicas pasaban de un laboratorio a otro, al mismo tiempo se difundía la visión eléctrica de la señalización nerviosa. Parsegian admite que: «Existe un sesgo cultural. La gente usa las herramientas que cree entender y desaprovecha las que no. Eso podría haber inclinado la forma de pensar».

Hoy las lagunas tecnológicas empiezan a desvanecerse. Cuando contacté con Heimburg entre 2011 y 2018, este repetía paulatinamente un viejo experimento tras otro, recurriendo a técnicas modernas para clarificar los asombrosos fenómenos que Tasaki y otros observaron por vez primera hacía décadas. En 2014, repitió el experimento del renacuajo ebrio, esta vez con membranas sintéticas en lugar de animales: al subir la presión hasta 160 atmósferas, los efectos de los anestésicos se revertían, excepto que en esta ocasión Heimburg logró vincular el efecto directamente a los cambios de fase de la membrana. En 2016 recurrió a la microscopía para medir con precisión, en una única célula, la onda mecánica que Tasaki e Iwasa descubrieron en 1979.

Heimburg, ahora con 58 años, busca financiación para lo que quizá sea el experimento más crítico de todos: cuantificar el calor que se genera cuando se transmite un impulso nervioso —o potencial de acción—. Tasaki lo había medido en haces de fibras, pero el alemán planea usar un microchip que medirá el calor desprendido por una sola neurona. El experimento abordaría una de las críticas fundamentales que recibe su teoría: que el breve cambio de fase de líquida a cristalina de la membrana nerviosa debería liberar, y reabsorber, más calor que el observado jamás por Tasaki. Nuestro protagonista sostiene que los experimentos antiguos subestimaron el calor generado; dado que las mediciones se realizaban en múltiples neuronas, el calor reabsorbido tras el paso de los primeros impulsos contrarrestaba el liberado por los impulsos posteriores. «La verdadera señal es probablemente mucho más alta», me contó a finales de 2017. Si los resultados lo corroboran, reforzarían su afirmación de que la membrana transmite una onda mecánica.

Quizás el aspecto más notable estribe en que otros han empezado a involucrarse, científicos ajenos a la materia que no están polarizados por las enquistadas disputas de antaño. Nongjian Tao, ingeniero de biosensores de la Universidad Estatal de Arizona, emplea láseres para rastrear impulsos mecánicos en neuronas individuales, como hicieron Tasaki e Iwasa, salvo que Tao refleja la luz directamente en el nervio en vez de en un diminuto espejo de platino, con lo que consigue una medición más sensible. Confía en poder monitorizar al unísono cientos de neuronas por separado en redes nerviosas, con láseres que detecten las ondas mecánicas cuando estas se propaguen de un lado a otro. Un trabajo así podría responder una cuestión clave. «No se pone en duda la existencia de estos efectos mecánicos», matiza el neurocientífico de la Universidad de Cambridge Simon Laughlin. «La pregunta es si las neuronas realmente los aprovechan con algún fin.»

Laughlin no trabaja con las ondas mecánicas, pero tras haber estudiado los canales iónicos durante 45 años, imagina que podrían influir en las pequeñas válvulas proteicas. Experimentos recientes hacen patente su exacerbada sensibilidad a las fuerzas mecánicas que soporta la membrana. Si fuese cierto que las ondas mecánicas ayudan a abrir y cerrar los canales, nuestra comprensión del cerebro cambiaría profundamente, ya que las neuronas y sus impulsos actúan como vehículo del pensamiento. Se sabe que los canales iónicos son ruidosos e inquietos: hasta las tenues vibraciones térmicas provocan su apertura o su cierre al azar. Los teóricos de la información llevan decenios afanándose por explicar cómo puede el cerebro adquirir una cognición fiable por medio de canales tan inestables. Pero las ondas mecánicas darían un propósito a las aperturas y los cierres. «Es sin duda una posibilidad», conviene Laughlin.

Hay indicios que lo corroborarían. Algunas neuronas de la corteza de los mamíferos parecen incumplir la teoría de Hodgkin y Huxley. Cuando desatan impulsos a un ritmo elevado, sus canales iónicos se abren, en conjunto, más rápido de lo esperado. Una posible explicación radica en que responderían en masa a perturbaciones repentinas en la membrana; así, la llegada de una onda mecánica que los abriera más o menos al unísono les permitiría generar impulsos a velocidades que de otro modo no alcanzarían. Y ello, a su vez, facilitaría la transmisión de la información a un ritmo vertiginoso, lo cual constituiría una posible base de la cognición. Desde esta perspectiva, el impulso nervioso sería tanto eléctrico como mecánico.

Heimburg y Schneider ocupan un lugar extraño en todo esto. Quizás un día lleguen a compartir el Nobel. O quizá terminen en medio de ninguna parte, paralizados por la misma insistencia que apresó a Tasaki tantos años. El hecho de que las ondas mecánicas hayan despertado el interés de neurocientíficos como Laughlin y de otros expertos como Tao abriría una importante puerta a los físicos. Pero Heimburg se mostró firme cuando hablamos en febrero. Me aseguró que «muchos intentan conciliar como sea el modelo de Hodgkin y Huxley con el enfoque que hemos planteado». Y sentenció: «Pero yo, personalmente..., no aceptaría ninguna suerte de compromiso entre ambos modelos». IyC

PARA SABER MÁS

On soliton propagation in biomembranes and nerves. Thomas Heimburg y Andrew D. Jackson en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 102, n.º 28, págs. 9790-9795, julio de 2005.

EN NUESTRO ARCHIVO

Canales iónicos en la membrana de la célula nerviosa. Richard D. Keynes en *IyC*, mayo de 1979.

Células de la glía. R. Douglas Fields en *IyC*, junio de 2004.

El potencial de acción de Hodgkin y Huxley. José M.ª Valderas en *MyC* n.º 65, 2014.





SISTEMA SOLAR

LA MISIÓN **NEW HORIZONS,** DE LA NASA, HA CAMBIADO TODO LO QUE CREÍAMOS SABER SOBRE ESTE LEJANO MUNDO

PLUTÓN AL DESCUBIERTO

S. Alan Stern

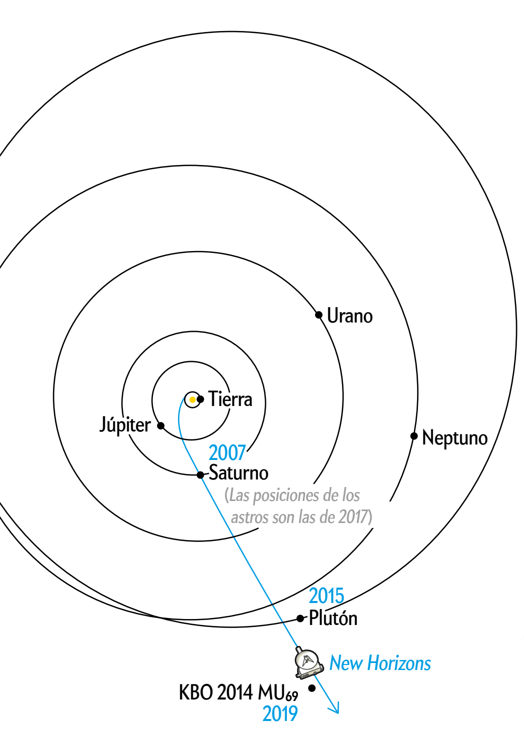
PLUTÓN muestra una enorme variedad de tonalidades y características superficiales en esta imagen con colores realzados tomada en 2015 por la sonda *New Horizons*.

EN SÍNTESIS

Tras un largo y accidentado proceso, la nave espacial *New Horizons*, de la NASA, fue lanzada en 2006 para explorar de cerca el sistema de Plutón.

Durante su sobrevuelo en el verano de 2015, la sonda descubrió que Plutón y sus satélites eran mucho más complejos y dinámicos de lo que se pensaba.

En lugar de un cuerpo estático y uniforme, la nave reveló imponentes montañas, vastos glaciares y una atmósfera mayor de lo esperado. Incluso en sus lunas, la *New Horizons* encontró accidentes asombrosos, como un casquete polar rojo y cañones. Ante el aluvión de datos que quedan por analizar, los científicos esperan que pronto lleguen muchos descubrimientos más.





S. Alan Stern es científico planetario y vicepresidente asociado de la división de ciencia espacial e ingeniería del Instituto de Investigación del Suroeste. Es el investigador principal de la misión New Horizons y fue director del Consejo de Misiones Científicas de la NASA.

Cuando el reloj se acercaba a las 9 de la noche del 14 de julio de 2015, me encontraba junto al entonces director de la NASA, Charles Bolden, y otras personas en el centro de control de nuestra misión, en el Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins, en Maryland. En cosa de un minuto debíamos recibir las primeras señales de la nave espacial *New Horizons*, que se encontraba a unos 4800 millones de kilómetros de distancia después de un osado sobrevuelo de Plutón y su sistema de cinco lunas, para el que solo había habido esa oportunidad.

Esa señal, que viajaba a la velocidad de la luz hasta las antenas gigantes de la NASA en la Tierra, nos diría si el sobrevuelo había salido bien o no. ¿Revelaría que nuestra misión se había ido al traste o que había tenido éxito? ¿O simplemente habría silencio? Podía pasar cualquier cosa.

En las inmediaciones, casi 2000 invitados aguardaban también las noticias, lo mismo que innumerables personas de todo el mundo que seguían el desarrollo de los acontecimientos a través de la televisión e Internet. Había costado más de 26 años llegar hasta allí: 14 años para «vender» el proyecto, 4 más para construir y lanzar la nave, y, por último, más de 9 para que esta cruzase el sistema solar. Para mí, como líder del proyecto, y para el personal y el equipo científico de la misión, todo aquello por lo que tanto habíamos trabajado dependía de lo que estábamos a punto de descubrir con la señal entrante.

De repente llegaron las comunicaciones. Segundos después, las enormes pantallas de ordenador del centro de control de la misión comenzaron a descifrarlas y a generar un informe sobre la salud de la nave espacial. Uno por uno, nuestros ingenieros de vuelo evaluaron sus datos y presentaron sus conclusiones, y todos y cada uno de ellos confirmaron que los sistemas de la nave funcionaban correctamente. La *New Horizons* había sobrevivido a su histórico sobrevuelo y se encontraba en perfectas condiciones. En el centro de control de la misión estallaron los vítores, las manos se alzaron para ondear banderas y los abrazos recorrieron la sala. Nuestra cruzada de casi tres décadas para llegar al mundo más distante jamás visitado, el Everest de la exploración planetaria, había tenido éxito.

A la mañana siguiente, la *New Horizons* ya había enviado sus primeras imágenes de alta resolución a la Tierra. Estas revelaban que Plutón era un mundo increíblemente complejo. Durante los siguientes días y meses fueron llegando datos de la nave, en un proceso que continuó hasta finales de 2016. En total, la *New Horizons* realizó más de 400 observaciones distintas con siete instrumentos científicos. Todo ello sumaba una cantidad de datos 5000 veces mayor que la reunida por la primera misión exitosa a Marte, la Mariner 4 de la NASA.

Ese botín de datos ha revolucionado lo que sabíamos sobre Plutón y sus lunas y ha dado un vuelco a las ideas habituales sobre lo complejos y energéticos que pueden ser los planetas pequeños. Además, la buena acogida del público —más de 2000 millones de páginas vistas en el sitio web de la misión, casi 500 portadas en periódicos durante la semana del sobrevuelo, docenas de reportajes en revistas, un Google Doodle (la cabecera gráfica del buscador) dedicado a la misión y otros muchos detalles— también constituyó una grata sorpresa.

A posteriori, es fácil ver lo valiosa que ha sido la exploración de Plutón, tanto para la investigación en sí como para la percepción pública de la ciencia planetaria. Pero, para ser honestos, debemos decir que la misión estuvo a punto de no despegar.

2001: UNA ODISEA DEL ESPACIO

La NASA anunció su firme intención de enviar una misión a Plutón ya en 1999, cuando invitó a equipos de todo EE.UU. a que propusieran instrumentos para una misión llamada Pluto Kuiper Express (PKE). Yo dirigí un equipo que presentó una propuesta para el combinado instrumental primario de cámara y espectrómetro. Pero, en septiembre del año 2000, el coste previsto para la PKE había crecido tanto que la NASA canceló la misión incluso antes de haber podido seleccionar los instrumentos que debían viajar a bordo.

Los científicos planetarios reaccionaron de inmediato criticando la cancelación y pidiendo a la NASA que la revocase. Los ciudadanos también se quejaron e inundaron la NASA con llamadas telefónicas y más de 10.000 cartas de protesta. Y un adolescente incluso condujo a través del país para pedirle a la NASA en persona que resucitase la exploración del noveno planeta. (Pese a ideas equivocadas muy extendidas, la mayoría de los científicos planetarios que conozco y yo mismo nos referimos a Plutón como planeta; no uso la definición de planeta de la Unión Astronómica Internacional, que excluye a Plutón,

PÁGINAS ANTERIORES: CORTESÍA DE LA NASA, LABORATORIO DE FÍSICA APLICADA DE LA UNIVERSIDAD JOHNS HOPKINS E INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DEL SUROESTE

ni verbalmente ni en los artículos de investigación.) Finalmente, en diciembre del año 2000, la NASA anunció que celebraría una competición de ideas para una nueva misión de sobrevuelo. Las propuestas debían seguir cumpliendo los objetivos de la misión PKE y tener un plan para llegar a Plutón hacia 2020, pero con aproximadamente la mitad de coste que la PKE. Finalmente, la agencia recibió cinco propuestas, grandes como guías de teléfono, que ofrecían planes detallados. Yo encabezaba uno de esos equipos. Llamamos a nuestra misión New Horizons («Nuevos Horizontes») porque estábamos proponiendo la que sería la primera exploración de un nuevo planeta por parte de la NASA desde las misiones Voyager de los años setenta.

Nuestro equipo, radicado en el Instituto de Investigación del Suroeste —donde trabajo— y en el Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins —donde se construiría y desde donde se controlaría nuestra nave espacial—, tenía mucha menos experiencia en misiones planetarias que nuestros principales competidores, pero lo suplimos con ingenio. Para reducir los costes, sugerimos enviar una sola nave espacial en lugar de dos, algo tan arriesgado que casi no tenía precedentes en una primera exploración de un planeta. También propusimos mantener la nave en hibernación durante el viaje de casi diez años a Plutón; el objetivo era reducir los costes de personal y poder concentrarnos en las posibilidades científicas a expensas de la capacidad para transmitir datos rápidamente tras el sobrevuelo. Perfeccionamos nuestra propuesta a conciencia y la sometimos a innumerables revisiones para asegurarnos de que era impecable en todos los aspectos: desde la realización técnica hasta la composición del equipo científico, los planes de gestión, la difusión pública, los aspectos educativos, el control de costes e incluso los planes de emergencia. A finales de noviembre de 2001, la NASA anunció que había elegido a New Horizons. ¡Habíamos ganado! Sin embargo, no teníamos ni idea de lo que se nos venía encima.

Para llegar a tiempo a nuestro lanzamiento, programado para enero de 2006, teníamos que diseñar, construir y poner a prueba la nave espacial en tan solo cuatro años y dos meses. Sin embargo, a otras misiones de la NASA, como Voyager, Galileo o Cassini, el mismo proceso les había llevado entre ocho y doce años. Además, nuestro presupuesto tan solo sería del 20 por ciento del que tuvo la misión Voyager. Y, justo cuando nos estábamos preparando para abordar estos retos, menos de tres meses después de haber sido seleccionados, el Gobierno del entonces presidente Bush propuso cancelar por completo la misión, sacándola del presupuesto federal publicado a principios de 2002. Esta decisión desencadenó una prolongada batalla por el dinero entre el Congreso y la Casa Blanca, la cual solo se resolvió cuando, en verano de 2002, la Academia Nacional de Ciencias otorgó a la exploración de Plutón una de las prioridades más altas en su *Decadal Survey* (el plan estratégico de la década) y convenció a suficientes congresistas. Por último, justo cuando empezábamos a pensar que nos encontrábamos fuera de peligro, dos cierres del Laboratorio Nacional de Los Álamos durante varios meses pusieron en riesgo la adquisición de suficiente plutonio para alimentar el generador de energía nuclear de la nave espacial.

En la NASA y la comunidad científica, muchos pensaron que el equipo de la misión New Horizons no podría sobreponerse a tantos reveses. Pero trabajamos —entiéndase al pie de la letra— noches y fines de semana, 52 semanas al año durante cuatro años, para superar estos obstáculos. Como resultado, conseguimos llegar puntuales a la plataforma de lanzamiento, listos para volar a Plutón.

UN «HOYO EN UN GOLPE» DE LARGA DISTANCIA

La *New Horizons* estaba equipada con todo lo necesario para aprender tanto como fuera posible durante su breve sobrevuelo del sistema de Plutón. La parte más importante de la sonda son los siete instrumentos que lleva a bordo. Entre ellos hay cámaras en blanco y negro y color, dos espectrómetros (que separan la luz en sus diferentes longitudes de onda para confeccionar mapas de la composición atmosférica y superficial) y un detector para estudiar el polvo que impacta contra la nave. A bordo también hay dos sensores de plasma espacial, empleados para medir a qué velocidad está perdiendo Plutón su atmósfera y la composición de los gases que escapan, así como un equipo de radio capaz de registrar la temperatura de la superficie y representar la temperatura y la presión atmosférica en función de la altitud.



ESTA IMAGEN TOMADA DESDE LA SONDA *NEW HORIZONS* muestra la bruma atmosférica suspendida sobre Plutón. A la izquierda pueden verse montañas que se elevan 4,5 kilómetros; a la derecha, glaciares que surcan el terreno. La extensión lisa de la parte superior es la llanura de nitrógeno helado conocida como Sputnik Planitia.

Ojos en el horizonte

La *New Horizons* transportó siete instrumentos científicos para recopilar tanta información como fuera posible sobre Plutón y sus cinco lunas durante su breve sobrevuelo del sistema. Este conjunto de instrumentos le permitió tomar fotografías en color y en blanco y negro, realizar mediciones espectroscópicas y de temperatura, así como detectar el polvo y el plasma espacial que iba encontrando la nave.

1 REX
El Experimento de Radiociencia utiliza el equipo de comunicaciones por radio de la nave espacial para medir la temperatura y la presión atmosférica de Plutón.

2 PEPSSI
El Espectrómetro para Investigaciones Científicas de las Partículas Energéticas de Plutón analiza la densidad y la composición de los iones de plasma de la atmósfera de Plutón.

3 SWAP
El instrumento Viento Solar Alrededor de Plutón mide la velocidad a la que Plutón está perdiendo su atmósfera y sus interacciones con el viento solar.

4 LORRI
La Cámara de Reconocimiento de Largo Alcance es una cámara telescópica que puede tomar fotografías de alta resolución a gran distancia. Los datos que recopiló sirvieron para confeccionar un mapa de Plutón y estudiar su geología.

5 SDC
El Contador Estudiantil de Partículas de Polvo, un instrumento construido y operado por estudiantes, analiza el polvo espacial que golpea la *New Horizons* en su viaje a través del sistema solar.

6 RALPH
Esta cámara y espectrómetro mide las longitudes de onda de la luz visible e infrarroja para hacer mapas del color, la composición y la temperatura de la superficie de Plutón.

7 ALICE
Efectúa mediciones espectroscópicas de la luz ultravioleta para estudiar la composición de la atmósfera de Plutón y buscar atmósferas alrededor de Caronte y los objetos del cinturón de Kuiper.

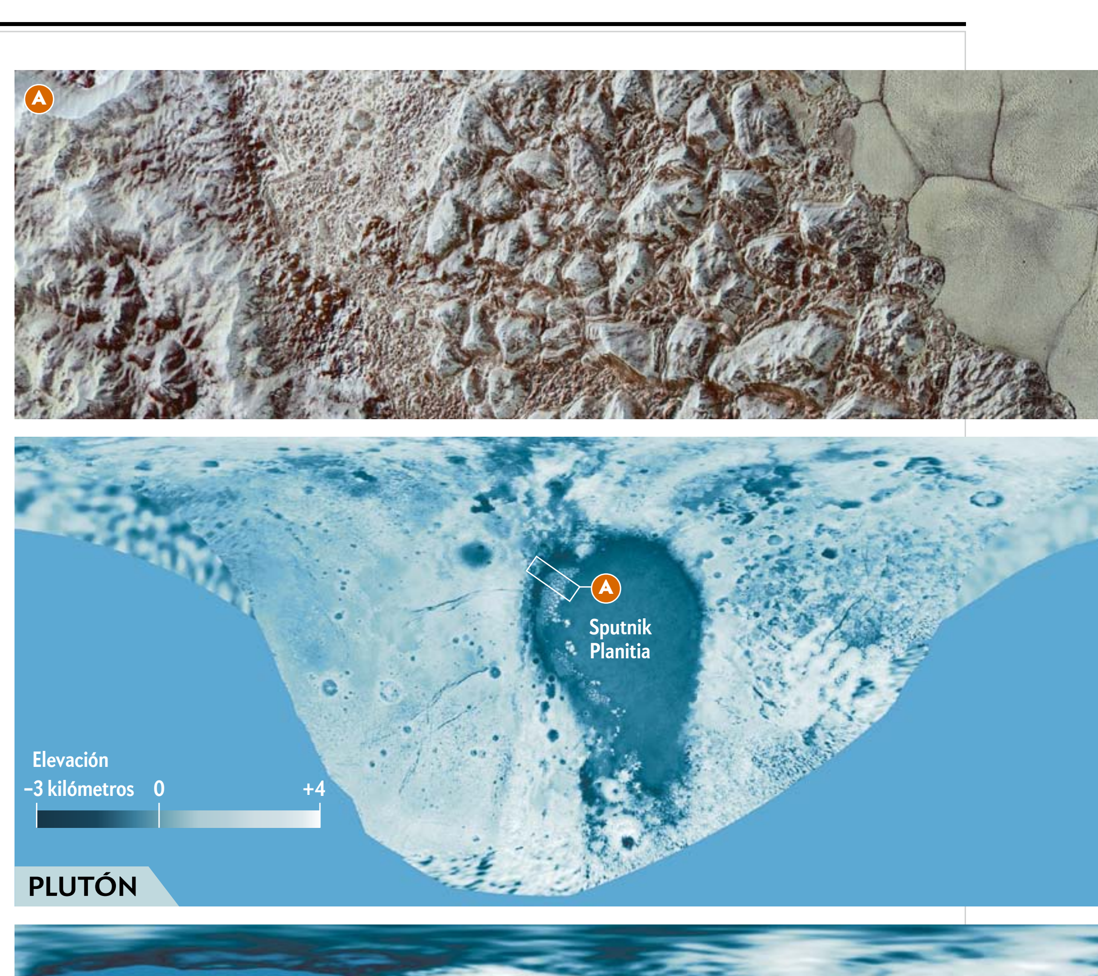
Estos instrumentos dotaron a la misión de una capacidad científica sin precedentes para tratarse de un primer sobrevuelo de un planeta. Ello se debía principalmente a que la *New Horizons* pudo beneficiarse de la tecnología de principios del siglo XXI, mientras que las misiones previas que habían llevado a cabo una primera aproximación, como las naves gemelas *Voyager*, habían sido construidas en los años sesenta y setenta. Por ejemplo, el espectrómetro para determinar la composición superficial que transportaba la *Voyager 1* tenía tan solo un píxel; el de la *New Horizons*, en cambio, tiene 64.000. Estos avances, combinados con una memoria capaz de almacenar cien veces más datos que las grabadoras de cinta magnética de la *Voyager*, significaban que la *New Horizons* podría ser mucho más eficaz que sus predecesoras.

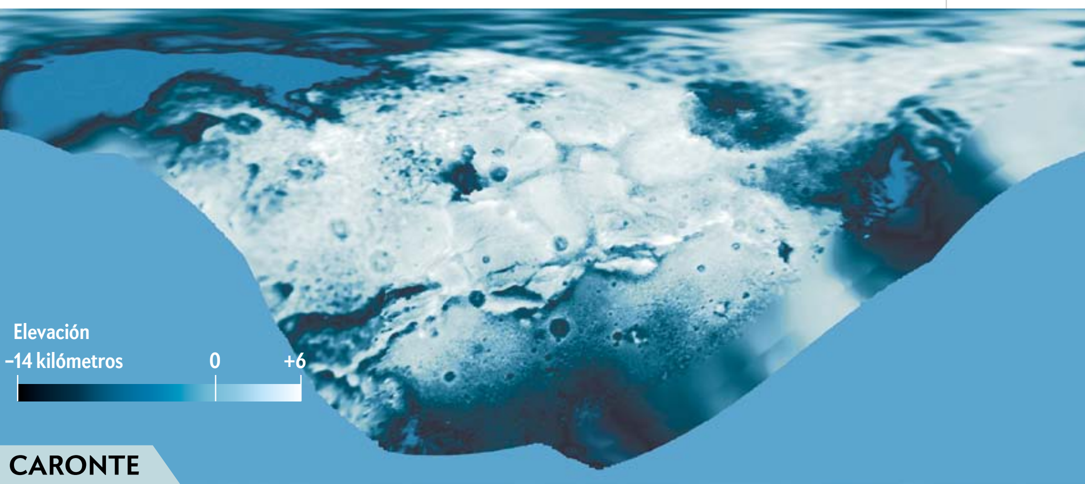
Aunque nuestra nave espacial estuvo «dormida» durante gran parte de su vuelo a Plutón, la planificación del sobrevuelo mantuvo ocupado a nuestro equipo durante casi todo el viaje. Para lograr sus objetivos, la *New Horizons* necesitaba llegar a su destino en una precisa ventana de tiempo de nueve minutos tras un vuelo de 9,5 años desde la Tierra. También tendría que atravesar una ventana espacial de tan solo 60 por 90 kilómetros aproximadamente. Aunque eso pueda parecer un blanco bastante grande, pretender acertar en él desde una distancia de 4800 millones de kilómetros vendría a ser como lanzar una pelota de golf desde Los Ángeles a Nueva York y conseguir un hoyo en un solo golpe.

También tuvimos que diseñar, poner a prueba y programar cada una de las actividades que queríamos que la *New Horizons* llevase a cabo durante los seis meses del sobrevuelo, el cual se extendería desde mediados de enero hasta mediados de julio de 2015. Entre esas actividades se incluían más de 400 observaciones para estudiar Plutón y sus cinco lunas con cada uno de nuestros siete instrumentos científicos; búsquedas de escombros y otros elementos peligrosos que pudiesen dañar la *New Horizons* durante la aproximación; búsquedas de nuevas lunas y anillos; observaciones para triangular la posición de

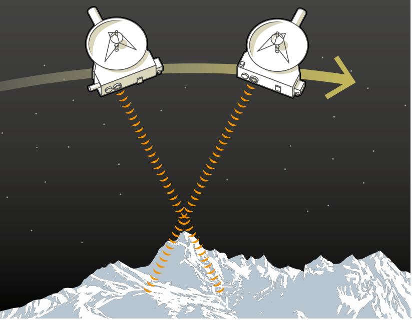
TERRITORIO DESCONOCIDO

Estos mapas topográficos globales de Plutón y Caronte, trazados a partir de datos estereoscópicos de la *New Horizons*, muestran la variedad de accidentes que presentan estos mundos. Las áreas más oscuras, como la Sputnik Planitia, la llanura helada del centro de Plutón, representan altitudes más bajas; las regiones más claras indican formaciones elevadas, como montañas. El terreno que falta en las esquinas inferiores, o bien estaba oscuro durante el sobrevuelo de la *New Horizons*, o no pudo resolverse estereoscópicamente. La fotografía superior muestra una franja de unos 80 kilómetros de ancho de la superficie de Plutón con «tierras baldías» rocosas (*izquierda*), montañas escarpadas (*centro*) y el borde del glaciar Sputnik Planitia.





La *New Horizons* observó el terreno desde dos ángulos diferentes, igual que hacen nuestros ojos, para medir la «paralaje» de las cimas de las montañas y otras formaciones elevadas (cuánto parecían desplazarse con respecto al terreno más bajo) y calcular así su altitud.



Esta gráfica no se reproduce a escala

CORTESÍA DE LA NASA, LABORATORIO DE FÍSICA APLICADA DE LA UNIVERSIDAD JOHNS HOPKINS E INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DEL SUROESTE (*terreno de Plutón*); NASA, LABORATORIO DE FÍSICA APLICADA DE LA UNIVERSIDAD JOHNS HOPKINS, INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DEL SUROESTE E INSTITUTO LUNAR Y PLANETARIO (*datos de la elevación*)

BRYAN CHRISTIE DESIGN (*ilustración*)

Plutón que nos ayudaran a dirigir la nave hacia allí; el encendido de los motores para asegurar el direccionamiento preciso del sobrevuelo; así como la transmisión de todos los datos obtenidos durante el acercamiento. También tuvimos que planear no uno, sino tres sobrevuelos de Plutón, cada uno a lo largo de una trayectoria distinta, por si encontrábamos restos peligrosos que nos obligasen a desviar la nave del camino inicialmente planificado. Finalmente, tuvimos que desarrollar un *software* de a bordo que se ocupara de más de 150 posibles averías de la nave o de sus instrumentos, así como diseñar procedimientos de control para docenas de posibles fallos de funcionamiento demasiado complejos para que el *software* de la sonda se encargase de ellos.

UN NUEVO PLANETA

Debido a su pequeño tamaño y su extremada lejanía, Plutón era bastante desconocido antes del sobrevuelo de la *New Horizons*. El mismo telescopio espacial Hubble apenas había podido resolver su disco. Casi lo único que sabíamos a ciencia cierta era que medía unos 2200 o 2300 kilómetros de diámetro y que tenía al menos cinco lunas, una atmósfera tenue, una superficie rojiza que contenía hielos de metano, nitrógeno y monóxido de carbono, así como indicios de un casquete de hielo polar y otras marcas superficiales de gran tamaño. Esas características indicaban que probablemente era más interesante y complejo que la mayoría de los mundos congelados del sistema solar exterior. Con todo, la *New Horizons* puso al descubierto un planeta

mucho más complejo, geológicamente diverso y activo de lo que la mayoría de los científicos habían imaginado.

Entre otros descubrimientos, encontramos que la atmósfera de Plutón alcanza cientos de kilómetros de altitud y que presenta docenas de capas concéntricas de niebla aunque pocas nubes, si es que hay alguna. La *New Horizons* midió por primera vez la presión atmosférica en la superficie de Plutón y halló que es de tan solo 11 microbares (aproximadamente la misma que reina en la parte superior de la mesosfera terrestre, a unos 80 kilómetros de altura y al borde del espacio). También descubrimos que Plutón está perdiendo su atmósfera entre 500 y 1000 veces más despacio de lo esperado, con una tasa de escape mucho más parecida a la de Marte o la Tierra que a la de los cometas, al contrario de lo que habían predicho los modelos anteriores al sobrevuelo. Y, sorprendentemente, descubrimos que las nieblas de Plutón tiñen su atmósfera de azul, lo que da a su cielo un color que recuerda marcadamente al de Tierra.

La *New Horizons* también ha revelado que Plutón es mayor de lo que indicaban la mayoría de los cálculos anteriores, con un diámetro real de 2377 kilómetros. Esta medición estableció definitivamente a Plutón como el mayor de los pequeños planetas del cinturón de Kuiper. Ese mayor tamaño, al combinarlo con la masa de Plutón (que ya conocíamos), rebajó su densidad. Eso significa que, si bien sigue siendo un mundo principalmente rocoso con un exterior helado, la proporción de roca se halla más cerca del 66 por ciento que de los valores superiores al 70 por ciento que esperábamos antes del sobrevuelo. La mayor parte de la masa restante (no rocosa) de Plutón es hielo de agua, con trazas de hielos más exóticos en su superficie. Los modelos del interior de Plutón basados en las mediciones de su tamaño, masa y forma realizadas durante el sobrevuelo aportan ahora pruebas circunstanciales convincentes de que Plutón esconde una capa oceánica de agua líquida a cientos de kilómetros de profundidad, allí donde la temperatura y presión alcanzan las del punto de fusión del agua.

Durante muchos años, los científicos planetarios habían debatido sobre si la superficie de Plutón presentaría una topografía lisa o escarpada. La respuesta dependía de lo profunda que fuese su capa superior de hielo de nitrógeno. Este hielo, que constituye la mayoría de la superficie de Plutón, es poco consistente y se hunde bajo su propio peso —incluso en la pequeña gravedad del planeta—, por lo que una capa gruesa prevendría la existencia de formaciones geológicas elevadas. Sin embargo, cuando la *New Horizons* llegó a Plutón, algunas de sus primeras imágenes de alta resolución revelaron montañas que se elevaban hasta los 4,5 kilómetros de altitud. Ello sugiere que el nitrógeno de la superficie de Plutón podría constituir solo un delgado revestimiento dispuesto sobre lo que más tarde identificaríamos como una capa de hielo de agua.

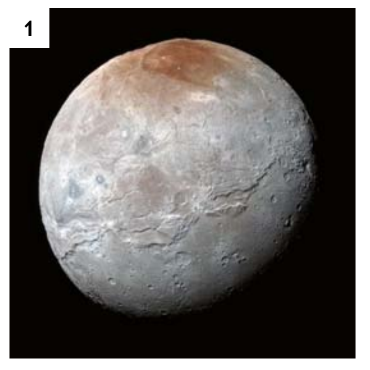
La *New Horizons* reveló una asombrosa diversidad geológica en Plutón. Vimos vastos glaciares, sistemas de fallas que se extendían a lo largo de cientos de kilómetros, terrenos caóticos y montañosos causados por la ruptura de gigantescos bloques de hielo, acantilados de metano en retroceso, picos cubiertos de nieve de metano en algunas cadenas montañosas, así como miles de hoyos de entre uno y diez kilómetros de ancho, creados presumiblemente por la sublimación del hielo de nitrógeno a lo largo de las llanuras ecuatoriales del planeta.

El mayor glaciar de Plutón, una extensión de hielo de nitrógeno llamada Sputnik Planitia (en honor a la *Sputnik* soviética, la primera sonda espacial), cubre un área de unos 800.000 kilómetros cuadrados. No se conoce ningún accidente geográfico como este en todo el sistema solar. Además, la Sputnik Planitia parece estar geológicamente viva, como revelan tanto los flujos de hielo que hay en ella como los patrones que aparecen en su superficie y que indican que existe una fuente de calor debajo. También vimos claros signos de que el hielo de esta formación se repone gracias a los glaciares y a los aludes procedentes de las cadenas montañosas que la rodean.

Pero las sorpresas geológicas de Plutón no acaban aquí. Si contamos sus cráteres, podemos calcular cuánto hace que se formó su terreno (cuanto más joven sea una superficie, menos tiempo habrán tenido los cráteres para formarse). Al hacerlo, encontramos un amplio abanico de edades superficiales a lo largo del planeta: desde antiguos suelos muy magullados de más de 4000 millones de años; pasando por regiones de mediana edad, de entre 100 millones y 1000 millones de años; hasta la propia Sputnik, donde no hay cráteres identificables, por lo que debe de tener menos —quizá mucho menos— de 30 millones de años. Esta variedad de edades era inesperada. La mayoría de los expertos habían predicho que el tamaño relativamente pequeño de Plutón habría hecho que se enfriase en un momento temprano de su historia y que, en consecuencia, habría perdido la capacidad de formar nuevas cubiertas en su superficie. No obstante, esta creencia generalizada se ha demostrado errónea. Plutón continúa geológicamente vivo hoy en día, aunque aún no tenemos claro cuáles son las fuentes de energía que impulsan todos estos cambios.

Pero aún había más. Los geólogos de nuestro equipo encontraron torres de hielo de metano que se elevaban más de 300 metros hacia el cielo y que formaban un sistema organizado de cientos de kilómetros de longitud. Y, por si todo eso no fuera suficiente para un solo mundo, también observamos lo que parecían ser grandes volcanes de hielo de apenas entre 100 y 300 millones de años, lo que hace pensar que estuvieron activos en el pasado reciente. Algunos miembros de nuestro equipo vemos en ello pruebas de la existencia de redes de canales de drenaje y de un lago congelado, lo que podría estar indicando que, en épocas pasadas, la presión atmosférica de Plutón fue mucho mayor (mayor incluso que la presión actual de Marte) y que los líquidos fluyeron e incluso se acumularon en la superficie.

En resumen, la impresionante variedad de características atmosféricas y superficiales de Plutón ha dejado de una pieza a la comunidad científica, pues nos ha mostrado





CARONTE, la mayor luna de Plutón, presenta profundos cañones y vastas llanuras de hielo (*1*). Una multitud celebra el sobrevuelo de la *New Horizons* en el Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins, en 2015 (*2*).

CORTESÍA DE LA NASA, LABORATORIO DE FÍSICA APLICADA DE LA UNIVERSIDAD JOHNS HOPKINS E INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DEL SUROESTE (*1*); CORTESÍA DE BILL INGALLS, NASA (*2*)

que los planetas pequeños pueden rivalizar con la Tierra y Marte en cuanto a complejidad.

LOS SATÉLITES DE PLUTÓN

Al igual que Plutón, sus cinco satélites eran casi completos desconocidos antes de que la *New Horizons* los explorara. Caronte, el mayor de estos mundos con diferencia (su diámetro es casi exactamente la mitad del de Plutón), fue descubierto en 1978 por los astrónomos Jim Christy y Robert Harrington con telescopios terrestres. Antes de la *New Horizons*, se sabía que estaba cubierto de hielo de agua inerte, que tenía poca o ninguna atmósfera y que era mucho menos colorido y reflectante que Plutón. Las cuatro lunas más pequeñas, Estigia, Nix, Cerbero e Hidra, fueron descubiertas con el telescopio espacial Hubble por miembros del equipo de la misión New Horizons entre 2005 y 2012. Se sabía muy poco de ellas antes de que la nave sobrevolase Plutón: solo se conocían sus propiedades orbitales y se sabía que sus colores eran más bien neutros, como los de Caronte. Incluso para su tamaño solo existían cálculos groseros. Ningún telescopio había podido resolverlas, así que simplemente eran puntos de luz en órbita alrededor de Plutón.

La *New Horizons* nos permitió crear mapas detallados de la geología, el color, la composición y el relieve topográfico de Caronte, medir su reflectividad ultravioleta, determinar con precisión su tamaño y forma, y buscar con mucha mayor sensibilidad una atmósfera. La nave no pudo volar tan cerca de ninguno de los otros cuatro satélites, así que, por fuerza, no pudimos aprender tanto sobre ellos. Pero, a pesar de ello, la *New Horizons* reveló sus tamaños, períodos de rotación y formas, y elaboró mapas aproximados en blanco y negro de cada uno de ellos. En el caso de Nix e Hidra, la sonda también generó mapas en color, efectuó mediciones de la composición y realizó cálculos de la edad superficial.

Como resultado de estos descubrimientos, ahora tenemos una imagen básica de Caronte que rivaliza con lo que las misiones Voyager, Galileo y Cassini nos han revelado sobre los grandes satélites helados de los planetas gigantes. Caronte no tiene atmósfera ni sustancias volátiles en la superficie, aunque sí encontramos afloramientos de hielos exóticos de amoníaco o amonio. A partir del recuento de cráteres, su superficie parece tener más de 4000 millones de años con pocas variaciones de edad, lo que significa que su motor geológico solo funcionó brevemente antes de apagarse. En ese corto tiempo, sin embargo, Caronte creó vastas llanuras cubiertas de hielo en su hemisferio sur, un extenso sistema de cañones hasta cinco veces más profundos que el Gran Cañón del Colorado, montañas y un «casquete polar» rojo en el polo norte que no se parece a ningún otro accidente geográfico del sistema solar. Ese polo rojo parece estar formado por el metano y el nitrógeno que fueron escapando de la atmósfera de Plutón a lo largo del tiempo. Estas especies se habrían depositado en los fríos polos de Caronte, donde la radiación ultravioleta las transformó en derivados de hidrocarburos de color rojo. Por su parte, el sistema de cañones de Caronte parece ser el resultado de tensiones titánicas producidas por el agua de su interior, la cual se habría congelado y expandido tras la formación de la luna.

Descubrimos que los cuatro satélites menores son tan reflectantes como Plutón, que a su vez lo es unas dos veces más que Caronte. Esa elevada reflectividad constituye un misterio, ya que sus superficies parecen estar hechas del mismo material que la de Caronte. Ninguno es lo suficientemente grande como para mantener una atmósfera. Y, a pesar de que todos tienen algunos cráteres cuya formación probablemente produjo anillos temporales alrededor de Plutón (con el material expulsado de los cráteres), actualmente no existen tales anillos en torno al planeta.

Las órbitas de Nix e Hidra parecen indicar que se formaron como resultado del mismo gran impacto sobre Plutón que dio origen a Caronte. Los mapas que hemos obtenido de estas lunas gozan de una resolución que nos permite reconocer en ellas varios cráteres. Su datación revela que sus respectivas superficies tienen una edad de unos 4000 millones de años, igual que la de Caronte. Eso demuestra que el impacto que formó estas lunas ocurrió muy temprano en la historia del sistema solar, por lo que no puede constituir la fuente de energía que impulsa la actividad geológica actual de Plutón. También descubrimos que los períodos de rotación de las cuatro lunas menores son rápidos en comparación con sus períodos orbitales: un resultado sorprendente que muestra que ninguna de ellas ha alcanzado ese equilibrio entre el movimiento de rotación y el de traslación que es causado por las fuerzas de marea y que se observa tan a menudo en los satélites de los planetas gigantes. Algo parece estar afectando a la rotación de estas pequeñas lunas; probablemente, el tirón gravitatorio del sistema binario formado por Plutón y Caronte.

Aunque la *New Horizons* ya ha transmitido a la Tierra todos los datos de su sobrevuelo sobre Plutón, hay aún numerosos aspectos de sus mediciones que apenas hemos examinado. Cabe esperar que, a medida que nuestro equipo y otros investigadores comiencen a digerir ese increíble volumen de datos, en los próximos años veamos aparecer numerosos descubrimientos adicionales sobre la superficie, el interior, el origen y la atmósfera de Plutón y sus lunas.

SIGUIENTE PARADA: EL CINTURÓN DE KUIPER

Aunque la exploración del sistema de Plutón ya ha concluido, la misión New Horizons continúa. En 2016, la NASA aprobó una extensión de cinco años, hasta mediados de 2021, para que la nave siga explorando el cinturón de Kuiper, el extenso anillo de pequeños cuerpos y pequeños planetas que orbitan más allá de Neptuno. Lo más destacado de esta incursión será un sobrevuelo del objeto del cinturón de Kuiper (KBO, por sus siglas en inglés) 2014 MU_{69}, que tendrá lugar el 1 de enero de 2019. Esta antigua roca rojiza, la cual se ha conservado en un estado de congelación profunda durante más de 4000 millones de años, será el resto más prístino de la formación del sistema solar que hayamos estudiado jamás. A pesar de medir solo unos 30 kilómetros de ancho, podría tener sus propias lunas, y se cree que es un ejemplo típico de los bloques fundamentales a partir de los cuales se formaron Plutón y otros cuerpos del cinturón de Kuiper.

La *New Horizons* se encontrará con MU_{69} cuando su distancia al Sol sea unas 44 veces mayor que la de la Tierra. La nave

utilizará toda su batería de instrumentos para estudiar la composición y la geología del objeto durante el sobrevuelo. Buscará indicios de actividad y de una atmósfera, tratará de encontrar lunas y anillos, y medirá su temperatura.

Además de este sobrevuelo cercano de MU_{69}, la *New Horizons* estudiará de cerca al menos otras dos docenas de KBO entre 2016 y 2021. Estas observaciones nos permitirán contextualizar nuestros resultados sobre MU_{69} y buscar satélites de estos objetos, estudiar las propiedades de su superficie y determinar su forma. La nave también medirá las propiedades del espacio en los confines del cinturón de Kuiper mediante el estudio del helio gaseoso, el viento solar y las partículas con carga presentes en región tan alejada de la influencia del Sol. También investigaremos la densidad de polvo en el cinturón de Kuiper hasta una distancia 50 veces mayor que la que media entre la Tierra y el Sol, justo más allá de los puntos más distantes de la órbita elíptica de Plutón.

Para después de 2021, somos optimistas acerca de que la NASA decida volver a extender la misión. La nave espacial se encuentra en buenas condiciones y tiene el combustible y la potencia necesarias para continuar funcionando y comunicándose con la Tierra hasta mediados de la década de 2030 o más allá. Durante ese período, la *New Horizons* podría estudiar muchos más KBO e incluso conseguir efectuar otro sobrevuelo cercano de uno de ellos.

HORIZONTES FUTUROS

Tras un accidentado período de desarrollo y un largo viaje a través del sistema solar, la *New Horizons* completó el reconocimiento del último de los planetas que se conocían en los albores de la era espacial, para después convertirse en la primera misión que explorará de cerca los pequeños cuerpos que pueblan el cinturón de Kuiper.

Durante 15 años, mientras planificábamos la misión y la nave volaba a su destino, desafié a nuestro equipo científico a usar todo el conocimiento adquirido durante la exploración de otros planetas para predecir lo que nos encontraríamos en Plutón. Sin embargo, la naturaleza nos ha sorprendido y nos ha revelado un planeta mucho más diverso y activo de lo que nosotros mismos esperábamos.

Plutón es tan complejo y dinámico que a muchos de los miembros tanto de New Horizons como de la comunidad astronómica en general nos gustaría que se enviara otra misión que nos permita seguir explorando el planeta y sus lunas desde una órbita a su alrededor. También nos gustaría que otras misiones de sobrevuelo reconociesen más cuerpos del cinturón de Kuiper para estudiar su diversidad, igual que otras naves espaciales han hecho con los planetas interiores y los planetas gigantes. Esperamos que el increíble éxito de New Horizons no suponga el final, sino el comienzo de la exploración de los planetas y los cuerpos más pequeños del cinturón de Kuiper. IyC

PARA SABER MÁS

The Pluto system: Initial results from its exploration by New Horizons. S. A. Stern et al. en *Science*, vol. 350, art. aad1815, 16 de octubre de 2015.
Chasing New Horizons: Inside the first mission to Pluto. Alan Stern y David Grinspoon. Picador, 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Viaje al planeta más lejano. S. Alan Stern en *IyC*, julio de 2002.
El sistema solar más allá de Neptuno. Michael D. Lemonick en *IyC*, enero de 2015.

por Marc Boada Ferrer

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



Auroras boreales caseras

Seguimos los pasos de Kristian Birkeland, quien hace ya más de un siglo consiguió reproducir este bello fenómeno natural en el laboratorio

¿Quién no se ha quedado extasiado alguna vez contemplando las auroras boreales o australes? Hay quienes lo han conseguido en directo, otros solo las hemos visto a través de la televisión, y todos nos hemos fascinado reflexionando sobre su origen. Precisamente para comprender su génesis, hoy traemos a estas páginas una versión de laboratorio que nos permitirá reproducirlas a nuestro antojo. Nos basaremos para ello en el trabajo de los grandes científicos que nos han precedido y, al mismo tiempo, intentaremos simplificar algunos de los experimentos contemporáneos de funcionamiento perfecto pero construcción onerosa.

Las auroras se producen debido al efecto del viento solar: partículas cargadas provenientes del Sol que interaccionan con el aire enrarecido de las capas altas de la atmósfera. El campo magnético terrestre desvía esas partículas hacia las polos, razón por la que las auroras se producen básicamente allí. Ahora bien, ¿cómo reproducirlas en un laboratorio?

El primer montaje experimental de este tipo se lo debemos a Kristian Birkeland, quien a finales del siglo XIX construyó una primera cámara de vacío donde sometía una esfera magnética a descargas de alta tensión. Su trabajo también se apoyó en los descubrimientos previos. Ya en 1747, Anders Celsius descubrió que el campo magnético terrestre era imprescindible en la dinámica de las auroras. Y, mucho antes, William Gilbert había construido una esfera magnética que imitaba a la Tierra y con la que verificó el comportamiento de las brújulas. La descripción de estos experimentos la publicó en 1600, y a su modelo magnético de nuestro planeta lo llamó *terrella*. Quizás inspirado en ello, Birkeland bautizó su experimento con el mismo nombre, el cual sigue usándose hoy en día.

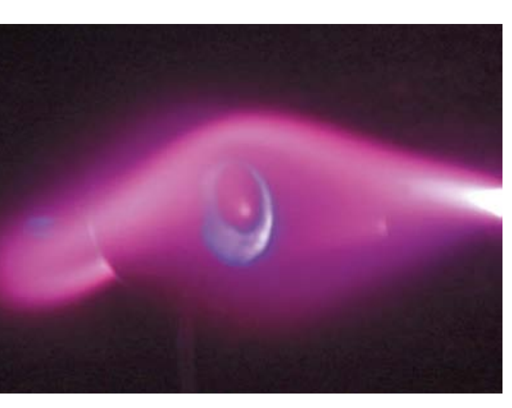
Desde hace unos años disponemos de una versión moderna de dicho montaje. Esta se debe a Jean Lilensten, investigador de la Universidad de Grenoble, quien ha ideado un dispositivo en el que la manipulación de las esferas y los electrodos puede hacerse desde el exterior de la cámara de vacío, lo que simplifica enormemente el ajuste de los elementos. Este instrumento ha recibido un nuevo nombre, *planeterrella*, y sus únicos inconvenientes son la complejidad y el precio de su construcción. Se trata en todo caso de un diseño óptimo, lo que le ha merecido diversas réplicas a lo largo y ancho del mundo, incluida una que se encuentra en la Universidad de Alcalá de Henares.

Así pues, animados por todo este corpus de conocimiento, nos decidimos a intentar la construcción de una versión casera, una *neoterrella*, apta para los aficionados a la experimentación científica de cierta complejidad.

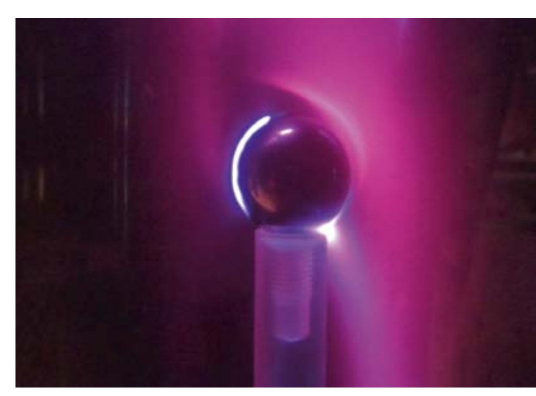
Pasemos, por tanto, a una primera descripción. Nuestro aparato constará de tres partes esenciales. La primera será la cámara de vacío. Birkeland usó una inmensa pecera de caras planas para construir una cámara de unos mil litros de capacidad. La idea no es mala, pero adolece de un gran problema: una vez hagamos el vacío, la presión atmosférica externa tenderá a romper la cámara con suma facilidad. En la planeterrella de Lilensten eso se resuelve empleando una campana acrílica de 50 litros, pero su precio echará para atrás a numerosos experimentadores.

Por todo lo anterior, para nuestra neoterrella optaremos por un tubo cilíndrico de metacrilato. Dos tapas también de plástico se encargarán de cerrar los extremos. En cada una de ellas dispondremos un electrodo: uno en forma de punta y otro esférico. Una vez los conectemos a una fuente de alta tensión, entre ambos se generará una diferencia de potencial que ionizará los gases que queden en la cámara. Por último, en el centro emplazaremos una

FOTOGRAFÍAS E ILUSTRACIONES DE MARC BOADA FERRER

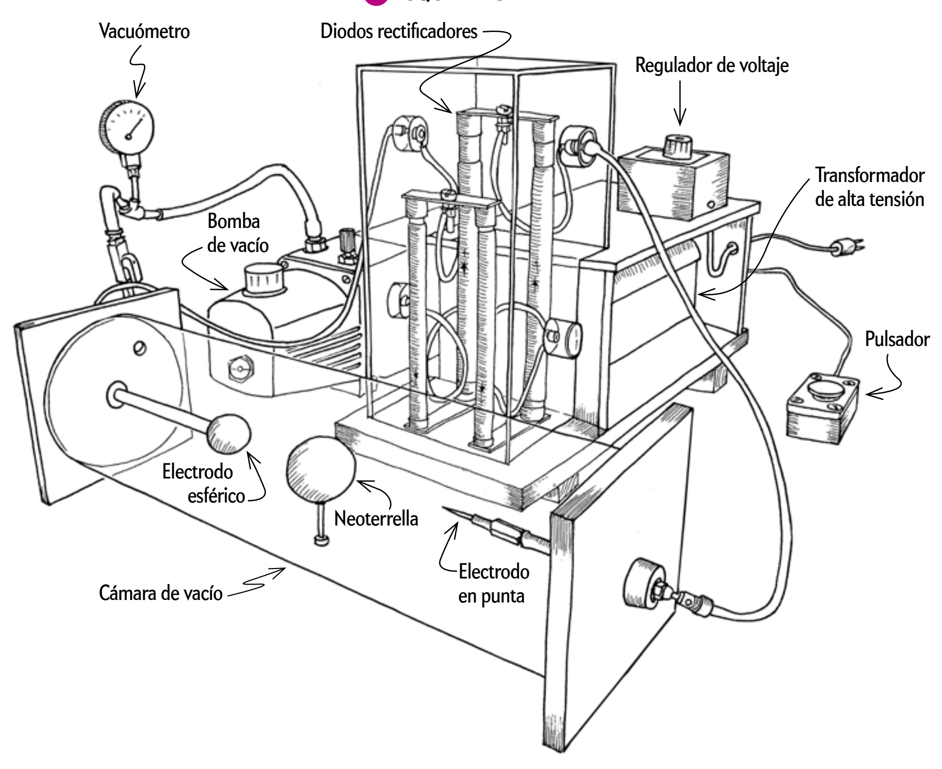




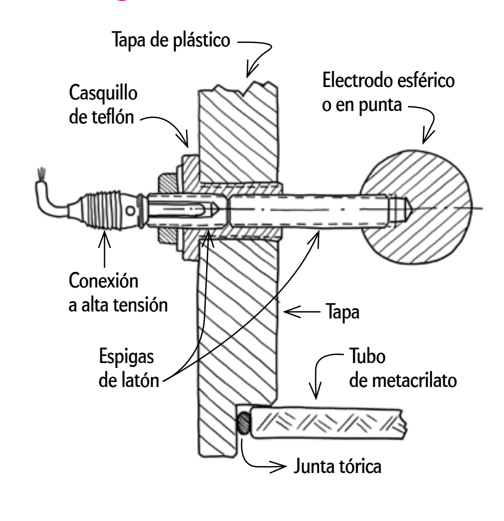


EFECTOS VARIABLES: El montaje descrito aquí permite combinar distintos elementos. Estas imágenes muestran una esfera magnética de hierro (*izquierda*), otra de aluminio (*centro*) y un imán esférico (*derecha*) y los distintos efectos aurorales que producen.

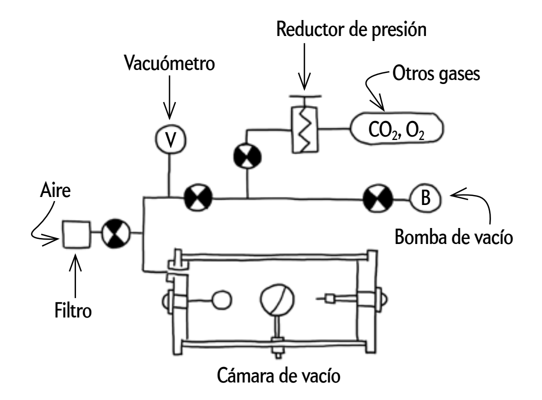
1 ESQUEMA GENERAL



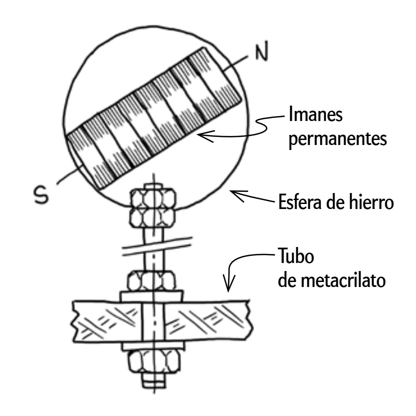
2 CONEXIÓN DE ELECTRODOS



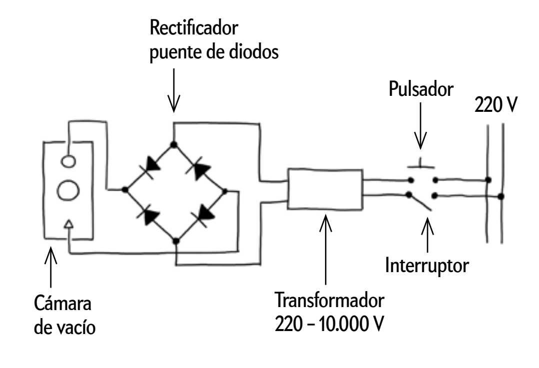
3 LÍNEA DE VACÍO



4 ESFERA MAGNÉTICA



5 CIRCUITO ELÉCTRICO



esfera de hierro en cuyo interior habremos colocado un imán de neodimio. Esta última esfera será nuestra neoterrella: un modelo en miniatura de nuestro planeta con su campo magnético **1**.

En las tapas no solo acoplaremos los electrodos, sino que deberemos practicar taladros para succionar el aire del interior y conseguir un vacío no demasiado elevado. Aquí entra el segundo gran bloque del instrumento. Por una vez no deberemos disponer de una bomba de vacío demasiado potente. Una máquina de un par de etapas, típica de laboratorio escolar, bastará para enrarecer los gases y conseguir que la descarga eléctrica genere luz. La presión que habremos de lograr será de unos 10 pascales: unas 10.000 veces menor que la que reina a nivel del mar y similar a la existente a decenas de kilómetros de altura, en las capas altas de la estratosfera.

En nuestro caso, simularemos esa corriente de partículas mediante descargas de alta tensión. Así pues, el tercer bloque de nuestro aparato será el que incluye los métodos para obtener tensiones muy elevadas y corrientes de cierta intensidad. Se dice que Birkeland usó descargas de 15.000 voltios y 500 miliamperios, algo muy peligroso. Lilensten, por su parte, rebaja ambos valores y trabaja con unos pocos miles de voltios y decenas de miliamperios. En nuestro modelo hemos optado por una solución fácil y barata, pero también de alto riesgo.

Expliquémonos. Una fuente de alta tensión que proporcione unos 5000 voltios y decenas de miliamperios es cara, aún más si es regulable. Buscando una alternativa más económica decidí ensayar con una fuente de alta tensión de las que se emplean en los rótulos de neón de los comercios. Estos transformadores convierten los 220 voltios de la red en 10.000 voltios con una intensidad de 50 miliamperios. Es decir, disipan más de 50 vatios, de forma que una descarga puede resultar peligrosísima. El experimentador se aproxima a los valores de Birkeland, pero habrá de asumir unos riesgos importantes que deberá minimizar con todo tipo de medidas de seguridad que detallaremos más adelante.

Pasemos a la construcción. En primer lugar, buscaremos un tubo de metacrilato con una longitud de entre 40 y 50 centímetros y un diámetro de 15 o 16 centímetros como mínimo. Nos aseguraremos de cortar perpendicularmente sus extremos y pulir el canto con toda perfección. Mecanizaremos unas tapas de plástico para cerrarlo, en las cuales aseguraremos unas juntas tóricas que untaremos con grasa de silicona para conseguir vacío 2.

Como puede verse en las ilustraciones, las tapas encajan en el tubo y presentan taladros en los que podremos alojar los electrodos y el tubo de vacío. Con algunos racores, llaves de paso y algo de paciencia, podremos confeccionar una circuitería que no solo nos permitirá evacuar el aire o restablecer la presión atmosférica, sino también acoplar un vacuómetro y una entrada para otros gases 3. En efecto, una vez hecho el vacío, los gases residuales que queden en la cámara tendrán la misma composición que la atmósfera: nitrógeno con una quinta parte de oxígeno, aproximadamente. Con las descargas de alta tensión ionizaremos estos gases, gracias a lo cual obtendremos unos admirables destellos de luz violácea. Pero, curiosamente, las auroras naturales se ven a menudo verdosas, color correspondiente a la emisión del oxígeno. Debo decir que, pese a haber inyectado oxígeno puro, he sido incapaz de conseguir esas tonalidades. Todo ha resultado mucho más fácil con CO_2, gas que desprende un color amarillento y que nos permite remedar el tipo de auroras que veríamos en Marte.

Describamos ahora la esfera magnética que imitará a nuestro planeta. Sabemos que Birkeland utilizó una esfera de cobre de unos 10 centímetros de diámetro en cuyo interior colocó un potente electroimán. No obstante, esto exigiría introducir en la cámara cables eléctricos de alimentación, los cuales siempre pueden ser puntos de pérdida de vacío. Dado que hoy disponemos de potentes imanes permanentes, nos decantaremos por imanes cerámicos de neodimio, que son los usados en todos los modelos que conozco.

En el caso que nos ocupa hemos utilizado imanes de 15 y 30 milímetros de diámetro y los hemos situado en el interior de una esfera de chapa de hierro. Esta fue particularmente difícil de encontrar: al final, la suerte puso en mis manos unas esferas magnéticas de juguete de 50 milímetros de diámetro que demostraron ser idóneas. Solo fue necesario eliminar una cubierta de plástico exterior para conseguir dos semiesferas de lámina de hierro que encajaban a la perfección. Además, probé también con esferas de aluminio y con imanes esféricos de un par de centímetros de diámetro. En el caso de los imanes de neodimio, el experimentador deberá unirlos hasta que su longitud se ajuste al interior de la esfera, como se muestra en la ilustración 4.

Más sencillo resulta construir los electrodos desde donde se producen las descargas. Para el electrodo en punta podemos emplear desde un alambre fino y muy aguzado hasta una varilla de wolframio muy puntiaguda. Estas últimas, las mejores posibles para descargas de alta tensión, las encontraremos en suministros industriales, donde se venden como electrodos de soldadura. Por otro lado, para el electrodo esférico podremos utilizar un pomo de puerta de latón perfectamente bruñido. Los hay de muy diversas medidas, siendo óptimos los de 30 o 40 milímetros de diámetro.

Una vez tengamos a punto la cámara cilíndrica, el sistema de vacío y los electrodos, solo nos restará montar la parte eléctrica. Más arriba explicábamos por qué merecía la pena decantarse por un transformador para tubos de neón. Pero esta posibilidad adolece de un inconveniente: necesitaremos que nuestra fuente de alto voltaje sea de corriente continua, ya que querremos que en el interior del tubo los electrones circulen en un solo sentido. No obstante, un transformador para tubos de neón proporciona corriente alterna.

Dicho problema tiene solución: podemos incorporar un rectificador, consistente en cuatro diodos para alta tensión. El montaje se muestra en el esquema eléctrico 5 y, al igual que todo el resto de la circuitería, debe realizarse con un cable eléctrico aislado con silicona para alta tensión. Por último, para minimizar los riesgos de descarga eléctrica, incluiremos un interruptor de corte para la alimentación del transformador y, en serie con este, un pulsador. La necesidad de mantener accionado este último para ejecutar las descargas garantizará que no podamos manipular el aparato cuando esté conectado y en funcionamiento.

Por fin podemos comenzar a experimentar. Empezaremos por la disposición más básica, que es la que mostramos en las ilustraciones. Conectemos el polo negativo de la fuente de alta tensión al electrodo en punta y el positivo al electrodo esférico. En el centro colocaremos nuestra esfera magnética, con los polos magnéticos a 45 grados con respecto al eje del cilindro. Después haremos el vacío y comprobaremos que no hay entradas de aire. Por último, conectaremos el interruptor general y, accionando el pulsador, generaremos una primera descarga.

De inmediato veremos aparecer una sinuosa línea luminiscente de un precioso color violáceo. El experimentador descubrirá que a oscuras resulta mucho más espectacular. Si, además, ponemos tras el tubo un fondo negro, el aspecto mejorará de manera considerable. Observemos con detenimiento la esfera magnetizada. La descarga se distribuye de manera irregular. En algunos puntos casi toca la esfera, mientras que en otros se aleja. Curiosamente, estas zonas coinciden con los polos magnéticos del imán que habíamos emplazado en el interior. Estamos observando la interacción entre los electrones que escapan del electrodo, las moléculas de gas residual y los campos magnéticos de nuestra neoterrella. Tenemos ante nuestros ojos una diminuta aurora boreal.

Pasemos ahora a otra disposición. Soltemos el pulsador, accionemos el interruptor para parar la alimentación y permutemos la polaridad de las conexiones. Ahora los electrones circularán desde el electrodo esférico hacia el de punta. Eso cambia las condiciones de nuestro experimento, ya que la densidad de corriente en la superficie de la esfera será mucho menor que en la punta. El flujo luminoso resulta ahora más difuso y la interacción con la esfera magnética se torna más dispersa.

Merece la pena proceder por ensayo y error e ir ajustando la distancia entre los electrodos. También podemos conectar la propia neoterrella a la fuente de alta tensión, o sustituir el electrodo en punta por una gran esfera. Cada una de estas modificaciones inducirá respuestas distintas, con lo que el catálogo de fenómenos se diversificará. El límite no es otro que la imaginación del experimentador.

Por ejemplo, al situar el imán permanente bajo distintos ángulos con respecto al electrodo en punta podemos simular distintos planetas, con su eje magnético más o menos inclinado con respecto del viento solar. Es también posible observar tenues anillos resplandecientes sobre la esfera, conocidos como «óvalos aurorales», e incluso podemos disponer dos esferas magnetizadas entre las que salta la descarga: el resultado serán bellísimos aros luminosos que simularán las interacciones entre planetas y satélites con fuertes campos magnéticos propios. IyC

por Bartolo Luque



Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid, donde investiga en teoría de sistemas complejos. Su labor docente y divulgativa ha sido reconocida por uno de los premios de la Real Sociedad Española de Física y la Fundación BBVA 2017.

El problema de los náufragos, los cocos, los monos y las fracciones continuas

Ventajas insospechadas de una representación alternativa de los números racionales

Cinco náufragos en una isla han recolectado durante la jornada todos los cocos que han podido. Por la noche, uno de ellos se despierta con cierta paranoia y decide esconder la parte de los cocos que por justicia le correspondería. Procede a dividir el total de cocos en cinco montones iguales y comprueba que le sobra uno. Tras lanzar el fruto sobrante a los irritantes monos y esconder su parte, vuelve a dormirse. Algo después, un segundo náufrago se despierta con la misma idea. Vuelve a dividir los cocos que quedan en cinco montones idénticos y, de nuevo, ocurre que sobra uno. Como su antecesor, lo arroja a los simios.

Los demás náufragos hacen exactamente lo mismo y, en todos los casos, sobra siempre un coco que lanzan a los monos. A la mañana siguiente, los cinco, con caras inocentes, dividen en cinco montones los cocos que había dejado por la noche el último náufrago, sin que esta vez sobre ninguno. Encuentre, sin usar un ordenador, el menor número de cocos que recolectaron los náufragos para que esta historia sea posible.

Con un poco de paciencia y buena letra, es sencillo hallar una ecuación algebraica que nos indique la solución. Una forma de hacerlo sería la siguiente. Si llamamos x al número original de cocos recolectados, la cantidad que dejó el primer náufrago paranoico fue cuatro quintas partes de $x - 1$:

$$4(x-1)/5 = (4x-4)/5\,.$$

El segundo dejó cuatro quintas partes de la cantidad anterior menos uno:

$$4[(4x-4)/5 - 1]/5 = (16x-36)/25\,.$$

Aplicando la misma regla, podremos ver que el tercero, el cuarto y el quinto náufrago dejaron, respectivamente,

$$(64x - 244)/125\,,$$
$$(256x - 1476)/625\,,$$
$$(1024x - 8404)/3125\,.$$

Puesto que la última pila de cocos se dividió en cinco partes idénticas sin que sobrara ninguno, dicha cantidad ha de ser múltiplo de 5. De modo que la respuesta pedida es la menor solución posible para x en la ecuación

$$(1024x - 8404)/3125 = 5y\,,$$

donde tanto x como y deben ser números enteros positivos. Simplificando, esto nos lleva a la ecuación diofántica indeterminada

$$1024x - 15.625y = 8404\,.$$

Tanto si el lector ha llegado hasta aquí por su cuenta como si ha seguido estas líneas, ahora estará pensando cómo encontrar la solución sin usar un ordenador, sin comenzar a probar sistemáticamente pares posibles de enteros.

A continuación vamos a dar con la respuesta usando fracciones continuas, un instrumento matemático que vivió su época dorada en el siglo XVIII y que, por desgracia, hoy ha quedado restringido a los especialistas en teoría de números, a pesar de su potencia y elegancia. Así pues, comencemos recordando qué son las fracciones continuas.

Fracciones continuas

Para ilustrarlas usaremos un ejemplo geométrico al clásico estilo griego. Tomemos un rectángulo de 31×41 unidades, como el representado en la primera figura del recuadro adjunto. Si dividimos las longitudes de los lados, obtenemos

$$41/31 = (31 + 10)/31 = 1 + 10/31\,.$$

Geométricamente podemos representar este resultado fragmentando el rectángulo original en un cuadrado de 31×31, que equivale a nuestro 1 en la expresión anterior, y un rectángulo de 10×31, que corresponde a la fracción 10/31. El resultado se muestra en la segunda figura del recuadro.

Repitamos ahora el mismo procedimiento para el nuevo rectángulo de 10×31. En este caso partimos de la fracción 31/10, que podemos escribir como

$$31/10 = (10 + 10 + 10 + 1)/10 = 3 + 1/10\,.$$

En términos gráficos, esto supone dividir el rectángulo en tres cuadrados de 10×10 y en un nuevo rectángulo de 1×10.

Aplicando una vez más nuestro algoritmo a este último rectángulo de 1×10, vemos que esta vez podemos dividirlo en 10 cuadrados de lado unidad. Puesto que ya hemos cubierto por completo el rectángulo con cuadrados, damos por finalizado el proceso. Veamos el desarrollo completo en términos algebraicos:

$$\frac{41}{31} = \mathbf{1} + \frac{10}{31} = \mathbf{1} + \frac{1}{\frac{31}{10}} = \mathbf{1} + \frac{1}{\mathbf{3} + \frac{1}{\mathbf{10}}}\,.$$

Observemos que el número 1 corresponde al número de cuadrados de 31×31, el 3 a la cantidad de cuadrados de 10×10, y el 10 al número de cuadrados de 1×1. Acabamos de encontrar los dígitos que representan al número racional 41/31 en forma de fracción continua.

Este procedimiento puede aplicarse a cualquier fracción p/q (o rectángulo de lados p y q). Para calcular su representación en fracción continua, se escribe en primer lugar la parte entera de p/q; después, se resta a p/q. Si la diferencia es cero, hemos acabado; de lo contrario, se halla el inverso de la diferencia y se repite el proceso con esta última fracción.

Este algoritmo nos permite representar p/q en forma de fracción continua:

$$\frac{p}{q} = a_0 + \cfrac{1}{a_1 + \cfrac{1}{a_2 + \cfrac{1}{\cdots + \cfrac{1}{a_n}}}} \,.$$

De esta manera, la fracción p/q queda determinada por la sucesión de números enteros no negativos $a_0, a_1, a_2, \ldots, a_n$. Podemos expresar de manera compacta el resultado anterior escribiendo

$$p/q = [a_0; a_1, a_2, \ldots, a_n] \,,$$

que es la forma estándar de denotar las fracciones continuas. El punto y coma indica que a_0 es la parte entera de p/q.

¿Podemos estar seguros de que el procedimiento anterior acabará siempre tras un número finito de pasos? La respuesta es negativa, y el lector puede comprobarlo si intenta aplicar el mismo método a un rectángulo con uno de sus lados inconmensurable, como por ejemplo el rectángulo áureo, en el que la proporcionalidad entre sus lados es la razón áurea:

$$\varphi = (1 + \sqrt{5})/2 \,.$$

En este caso, nuestro algoritmo siempre deja en cada paso un cuadrado y un rectángulo áureo, en un proceso que no conoce fin. Es fácil verlo si nos percatamos de que la razón áurea puede reescribirse de la siguiente manera:

$$\varphi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = 1 + \frac{1}{\varphi} \,.$$

Ahora, puesto que φ aparece a la derecha de la igualdad, podemos sustituirlo por su expresión una y otra vez:

$$\varphi = \mathbf{1} + \frac{1}{\varphi} = \mathbf{1} + \cfrac{1}{\mathbf{1} + \cfrac{1}{\varphi}} \mathbf{1} + \cfrac{1}{\mathbf{1} + \cfrac{1}{\mathbf{1} + \cfrac{1}{\varphi}}} = \cdots$$

De modo que el número áureo posee una fracción continua infinita:

$$\varphi = [1; 1, 1, 1, \ldots] \,.$$

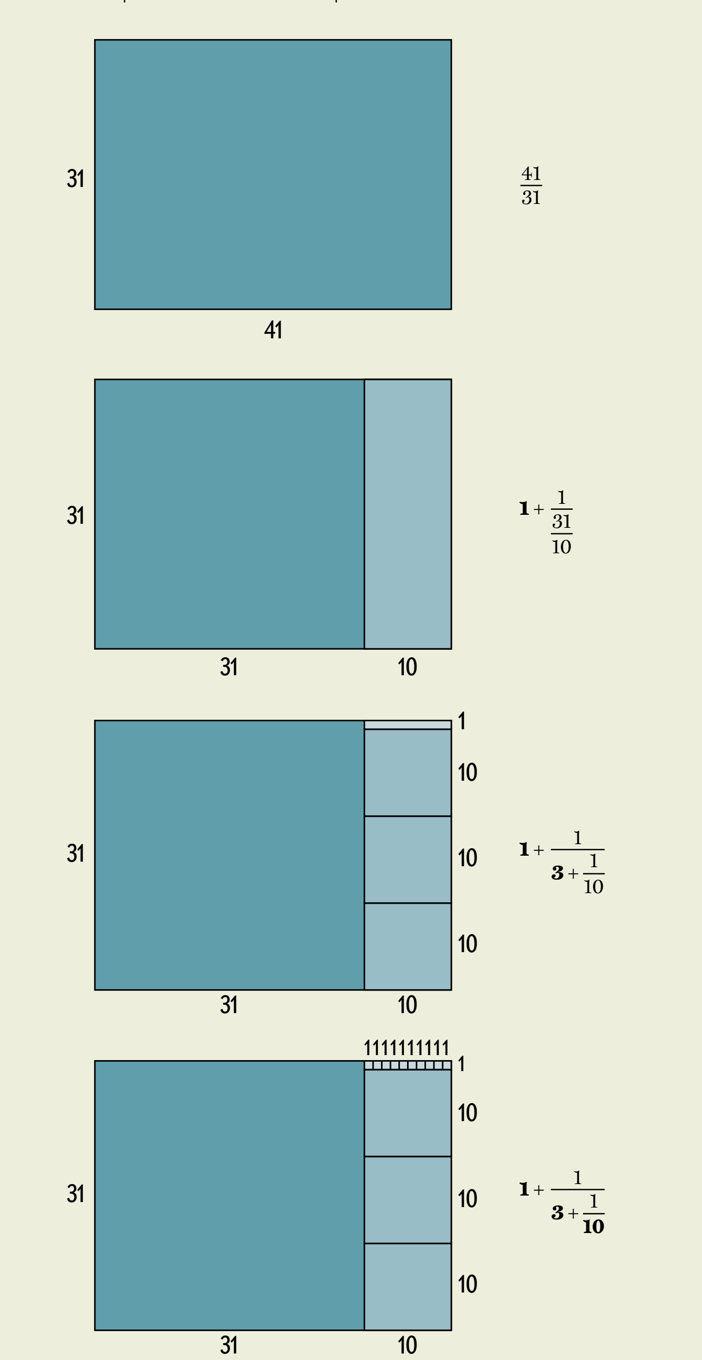
Como el lector puede probablemente intuir, los números racionales están re-

GEOMETRÍA DE LAS FRACCIONES CONTINUAS

La representación en fracción continua de un cociente p/q se obtiene al reescribir la fracción original de la siguiente forma:

$$\frac{p}{q} = a_0 + \cfrac{1}{a_1 + \cfrac{1}{a_2 + \cfrac{1}{\cdots + \cfrac{1}{a_n}}}} \,.$$

Geométricamente, los distintos términos a_k pueden hallarse dividiendo un rectángulo de lados p y q en cuadrados del mayor tamaño posible. La secuencia gráfica que reproducimos aquí ilustra el proceso para la fracción 41/31. Los números en negrita indican la cantidad de cuadrados idénticos que se obtienen en cada paso.



presentados siempre por fracciones continuas finitas, y los irracionales, por fracciones continuas infinitas. Esta es una de las virtudes de este sistema de representación numérico frente a la representación decimal, donde la finitud o infinitud de una expresión no basta para distinguir los racionales de los irracionales.

Convergentes y planetarios

El astrónomo, físico y matemático Christiaan Huygens proyectó en 1682 un planetario mecánico capaz de remedar el movimiento de los planetas del sistema solar. Contaba para ello con un complejo sistema de engranajes que movían los brazos en cuyos extremos se situaban los planetas. Huygens, inventor del reloj de péndulo, tenía experiencia en la construcción de mecanismos de relojería. Sabía que si deseamos que un engranaje produzca p revoluciones en un eje y que, al mismo tiempo, genere q en otro, la proporción entre el número de dientes de las dos ruedas ha de ser p/q.

Huygens estimaba que, en un año terrestre, nuestro planeta completaba un ángulo de $359^{\circ}\,45'\,40''\,31''' = 77.708.431'''$ alrededor del Sol: los casi 360° que nos obligan a tener un año bisiesto cada cuatro (el símbolo $'''$ denota un «tercero», la sesentava parte de un segundo de arco). Sin embargo, en ese tiempo Saturno solo cubría $12^{\circ}\,13'\,34''\,18''' = 2.640.858'''$. Por supuesto, era imposible fabricar una rueda con 77.708.431 dientes y otra con 2.640.858.

Hacia aquella época, el matemático inglés John Wallis trabajaba con unas fracciones que denominaba *continue fractum*, fracciones continuas. Huygens, que estaba al tanto del trabajo de Wallis, tuvo la gran idea de usar fracciones continuas para solventar el problema de los engranajes. Se le ocurrió calcular la fracción continua de la razón del número de dientes de las dos ruedas:

$$77.708.431/2.640.858 = [29;\, 2, 2, 1, 5, 1, 4, 1, 1, 2, 1, 6, 1, 10, 2, 2, 3]$$

y ver qué valores devolvía la fracción continua a medida que tomaba más y más términos, o «convergentes». Huygens halló que

$$[29] = 29/1\,;$$
$$[29;\, 2] = 59/2 = 29{,}5\,;$$
$$[29;\, 2, 2] = 147/5 = 29{,}4\,;$$
$$[29;\, 2, 2, 1] = 206/7 = 29{,}428...\,;$$

el cual es exacto hasta el segundo decimal, ya que 77.708.431/2.640.858 = 29.425...

A medida que vamos tomando más y más términos de la fracción continua, nos acercamos cada vez más al valor exacto, alternando aproximaciones por defecto y por exceso. Huygens se detuvo aquí porque así obtenía una magnífica aproximación con números asumibles mecánicamente: la diferencia entre ambas proporciones era mínima (aproximadamente 0,003), de modo que, con un par de ruedas de 7 y 206 dientes, podía conseguir casi el mismo efecto que con ruedas de 77.708.431 y 2.640.858 dientes.

La solución al problema de los cocos

El k-ésimo convergente de una fracción continua $[a_0;\, a_1, a_2, ...]$, finita o infinita, se define como:

$$p_k/q_k = [a_0;\, a_1, a_2, ..., a_k]\,.$$

Puede demostrarse que el convergente p_k/q_k del número real x es siempre la mejor aproximación racional a x con denominador menor o igual a q_k. Una extraordinaria propiedad de gran utilidad práctica, como acabamos de ver.

Por otro lado, la propiedad que nos va a permitir resolver el problema de los náufragos es una fórmula que relaciona convergentes sucesivos:

$$p_k q_{k-1} - q_k p_{k-1} = (-1)^{k-1},$$

la cual no resulta difícil de demostrar por inducción. Podemos comprobarla con los convergentes anteriores: 29/1, 59/2, 147/5 y 206/7 (k = 0, 1, 2, 3). Vemos que, en efecto, para k = 1, 2 y 3, tenemos:

$$59 \times 1 - 2 \times 29 = 1\,,$$
$$147 \times 2 - 5 \times 59 = -1\,,$$
$$206 \times 5 - 7 \times 147 = 1\,.$$

¿Y qué tiene que ver esto con nuestro problema? Recordemos que deseábamos resolver la ecuación

$$1024x - 15.625y = 8404\,.$$

Observemos que $1024 = 2^{10}$ y $15.625 = 5^{6}$ son coprimos, luego no podemos sacar factor común. Eso significa que nos basta con resolver la ecuación

$$1024x - 15.625y = 1$$

y multiplicar al final el resultado por 8404.

Notemos ahora el parecido de esta última ecuación con la fórmula que relaciona convergentes sucesivos. Si calculamos la fracción continua de 1024/15.625, veremos que

$$1024/15.625 = [0;\, 15, 3, 1, 6, 2, 1, 3, 2, 1]\,.$$

Tomando $p_9 = 1024$ y $q_9 = 15.625$, esta última expresión puede reescribirse como

$$p_9/q_9 = [0;\, 15, 3, 1, 6, 2, 1, 3, 2, 1]\,,$$

lo que nos permite calcular p_8/q_8:

$$p_8/q_8 = [0;\, 15, 3, 1, 6, 2, 1, 3, 2] = 711/10.849\,.$$

Por último, usando la fórmula que vincula ambos convergentes, tenemos que:

$$p_9 q_8 - q_9 p_8 = 1024 \times 10.849 - 15.625 \times 711 = 1\,,$$

que automáticamente nos proporciona una solución para nuestra ecuación:

$$x = 10.849,\;\; y = 711.$$

Recordemos que multiplicando por 8404 tenemos una de las posibles soluciones al problema original:

$$x = 91.174.996,\;\; y = 5.975.244.$$

Y ahora el último truco: es fácil ver que, una vez que disponemos de una solución particular, podemos construir todas las demás como

$$x = 91.174.996 + 15.625k,$$
$$y = 5.975.244 + 1024k,$$

donde k denota un entero cualquiera.

Puesto que tanto x como y deben ser positivos siendo x lo menor posible, busquemos el primer k que lo satisface. A partir de las soluciones vemos que esta condición implica

$$k > -91.174.996/15.625 = -5835{,}19...\,,$$
$$k > -5.975.244/1024 = -5835{,}19...$$

Así que el valor buscado es $k = -5835$.

Al sustituir este valor de k, vemos que el número total de cocos que recolectaron fue $x = 3121$ y lo que se llevó cada uno en el reparto final fue $y = 204$. Un hartón de cocos que no justifica la paranoia nocturna de los náufragos. IyC

PARA SABER MÁS

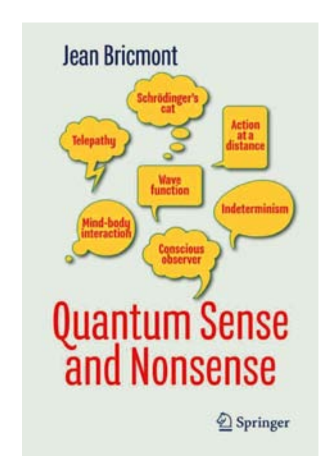
Concrete mathematics: A foundation for computer science. Ronald L. Graham, Donald E. Knuth y Oren Patashnik. Addison-Wesley, 1994.

Christiaan Huygens' Planetarium. H. H. N. Amin, diciembre de 2008. Disponible en **www.irem.univ-mrs.fr/IMG/pdf/huygens-delft.pdf**

EN NUESTRO ARCHIVO

Radicales infinitamente jerarquizados. Bartolo Luque en *IyC*, octubre de 2014.

El árbol de Farey y sus frutos irracionales. Bartolo Luque en *IyC*, diciembre de 2017.



QUANTUM SENSE AND NONSENSE

Jean Bricmont
Springer, 2017

Trampas bohmianas

De la desmitificación de la física cuántica a la teoría de la conspiración

Si los libros llevaran advertencias, como las cajetillas de tabaco, la de este *Quantum sense and nonsense* de Jean Bricmont podría ser «¡Cuidado! Este libro no es lo que parece». En efecto, tanto el título como la portada, la contraportada y el prefacio nos sugieren que la idea principal del texto es la de «disipar el misticismo que ha rodeado a la mecánica cuántica». En esta era de desinformación organizada en la que la mecánica cuántica suele servir de coartada para todo tipo de supercherías pseudocientíficas, un libro con ese noble objetivo es probablemente necesario, incluso urgente [*véase* «Mecánica cuántica: interpretación y divulgación», por Adán Sus; Investigación y Ciencia, julio de 2017]. Es por ello por lo que el curioso lector no puede sino decepcionarse cuando, ya en la página 6, se nos anuncia que las respuestas a las supuestas tres grandes cuestiones de la física cuántica (el papel del observador, la cuestión del determinismo y la concerniente a la localidad) se nos darán dentro del marco de la teoría de Bohm-De Broglie.

Formulada en los años veinte del siglo pasado por Louis de Broglie y redescubierta en los años cincuenta por David Bohm, esta teoría constituye una alternativa a la mecánica cuántica (o más bien, una reinterpretación) en la que las partículas son «guiadas» por una onda que las acompaña y que se mueve en un potencial cuántico. Pertenece a la familia de las llamadas teorías de variables ocultas; es decir, aquellas que añaden a la mecánica cuántica usual una variable no regida por la teoría cuántica estándar (en este caso, la posición de la partícula). Las teorías de variables ocultas «locales» (aquellas que no generan efectos que se propaguen más rápido que la luz) han sido descartadas por los experimentos basados en las desigualdades de Bell [*véase* «Un test de Bell sin escapatorias», por Carlos Abellán, Waldimar Amaya y Morgan W. Mitchell; Investigación y Ciencia, enero de 2016]. Sin embargo, la teoría de Bohm es no local. La mayor diferencia con la mecánica cuántica es que, en ella, las partículas sí siguen trayectorias bien definidas.

Con todo, varios trabajos teóricos y experimentales han demostrado que las trayectorias predichas parecen entrar en contradicción con lo que realmente se observa en algunos experimentos; un problema que los bohmianos achacan a las características del propio proceso de medida. Pero, además, el origen y el significado de su extraño potencial cuántico no están nada claros y, sobre todo, no parece haber manera de combinar esta teoría con la relatividad especial einsteiniana para dar lugar a una alternativa a la teoría cuántica de campos, la cual no solo es capaz de explicar de manera asombrosa los experimentos de partículas elementales, sino que predice con éxito la existencia de nuevas partículas, como el célebre bosón de Higgs.

El autor se da rápidamente cuenta del problema ético y lógico que se plantea al intentar exponer ante el público general una teoría que, aunque bien conocida desde hace más de sesenta años, sigue siendo minoritaria en la comunidad científica. ¿No sería mejor intentar convencer primero a esta última? Su respuesta es que distinguirá siempre entre «lo que es generalmente aceptado y lo que no lo es»; se referirá a «libros que exponen visiones distintas» a la suya y, por último, que «no hay un consenso científico sobre las cuestiones discutidas» en la obra.

Esto último es una trampa evidente: puede que haya discusión sobre esas cuestiones, pero el consenso es claro en cuanto a que la teoría de Bohm no proporciona una descripción adecuada de la naturaleza. En lo que se refiere a los dos primeros argumentos, el lector verá pronto que esas buenas intenciones se ven desmentidas por el tratamiento del libro: los defensores de la interpretación usual y mayoritaria de la teoría cuántica (llamados por el autor «ortodoxos») son descritos sistemáticamente como individuos que se encogen sin cesar de hombros y que, o bien no tienen ningún interés en los fundamentos de la teoría, o bien tienen todo tipo de ideas fabulosas sobre la realidad.

Para ello se recurre a una cierta cantidad de citas muy manidas y sacadas de contexto, todas ellas de hace décadas. No hay ninguna intención de hacer una presentación equilibrada y actualizada del debate sobre la interpretación de la física cuántica. Se incurre en tergiversaciones y manipulaciones evidentes: incluir una y otra vez una frase de Wigner sobre la consciencia (el propio Wigner cambió de idea más adelante, como se reconoce en una nota al pie), abusar de una evidente *boutade* de David Mermin, y cortar una frase de John Archibald Wheeler para hacer creer que la interpretación usual de un experimento es que podemos «modificar el pasado» (unas líneas más adelante, Wheeler explica que esa es una manera incorrecta de pensar, pero parece que al autor se le olvidó incluirlo). La única interpretación de la mecánica cuántica que se discute en detalle es, casualmente, la más minoritaria y fabulosa de todas (la interpretación de los «muchos mundos»), en un intento de reforzar el efecto de que no hay alternativas racionales a la teoría de Bohm.

El autor no es capaz de resistirse al influjo de las siempre atractivas teorías de la conspiración. ¿Cómo explicar que las ideas que defiende sean minoritarias en la comunidad científica? Muy fácil: «Las ideas de Einstein, Schrödinger, De Broglie, Bell y Bohm nunca fueron realmente entendidas y, por tanto, nunca fueron realmente refutadas. En su famoso debate, Bohr no respondió de la manera adecuada a Einstein; la paradoja del gato de Schrödinger fue ignorada; las teorías de De Broglie y Bohm se rechazaron sin ser examinadas. Finalmente, el resultado de Bell sobre no localidad fue casi universalmente mal entendido».

¿En serio? ¿El gato de Schrödinger, ignorado? ¿Einstein y las desigualdades de Bell, no entendidas? A medida que avanza el libro, el autor se va animando y pierde el control: «Pero, como la ortodoxia nos ha

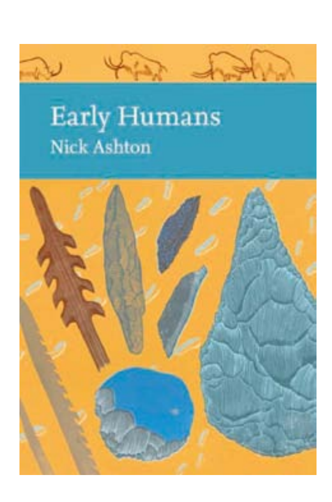
dicho que la mecánica cuántica es completa y que "variables ocultas" es una mala palabra, no verán nada nuevo en esto» (refiriéndose a cómo los físicos solemos interpretar las desigualdades de Bell).

El asunto se pone involuntariamente cómico cuando llegamos al debate Einstein-Bohr. Tras dedicar el grueso del libro a explicar que la mayor parte de la comunidad de físicos no ha entendido aspectos básicos de la teoría, el autor confiesa que no está «muy seguro de cuáles eran los puntos de vista de Bohr». No es extraño, ya que en lugar de citar directamente el famoso artículo de Bohr de 1935, Bricmont incluye una cita (llena de cortes nada casuales, una vez más) de Bell citando a Bohr. ¿No ha leído el autor el artículo original? Su tesis, directamente importada de Bell, es que el discurso de Bohr era abstruso e ininteligible. Sin embargo, la lectura completa del artículo de Bohr deja un mensaje prístino, que además tiene la ventaja de seguir siendo correcto más de ochenta años después: no hay manera de realizar una medida sin perturbar de alguna manera el objeto que se mide, cuestión central en el debate entre Einstein y Bohr.

Por último, tras intentar contenerse durante varios capítulos, el autor aprovecha la coartada de una supuesta discusión sobre el impacto cultural y filosófico de la teoría cuántica —en realidad, todo se presenta de manera somera y superficial— para introducir, ya sin ambages, la teoría de la conspiración en todo su esplendor: las ideas de Bohm (publicadas en *Physical Review*, la mejor revista de física del mundo) fueron rechazadas por sus convicciones políticas y, durante décadas, una especie de élite científica habría bloqueado activamente cualquier alternativa a la interpretación usual de la teoría cuántica. El sonrojo del lector ya es, a estas alturas, de incredulidad ante tanta desfachatez intelectual.

¡Qué ocasión perdida para un libro cuyo auténtico objetivo fuera el de disipar el misticismo que rodea a la física cuántica en la cultura popular! Mucho me temo que este solo contribuirá a aumentar la confusión.

—Carlos Sabín Lestayo
Instituto de Física Fundamental (CSIC)
Madrid



EARLY HUMANS
Nick Ashton
William Collins, 2017

El Paleolítico y Mesolítico británicos

Crónica de un episodio clave para entender la transformación que vive en nuestros días la paleoantropología

La paleoantropología parece despertar de su letargo con una eclosión de nuevos planteamientos, ideas e hipótesis. Según revelaciones de este mismo año, una mandíbula y piezas dentarias desenterradas tiempo atrás en Israel serían los fósiles de *Homo sapiens* más antiguos encontrados fuera de África, lo que atestiguaría su llegada a la península arábiga. Ocurrida hace unos 180.000 años, se discute si esta fue una incursión esporádica o un asentamiento de mayor permanencia. Por otro lado, un cráneo hallado en una cueva de Marruecos ha adelantado el origen de nuestra especie: con una antigüedad de unos 300.000 años, tales restos serían unos 100.000 años anteriores a los fósiles de Etiopía de humanos plenamente modernos, los cuales se suponían los más antiguos. El registro marroquí plantea, entre otros interrogantes, un posible origen africano distinto del canónico.

A ello se ha sumado la genética, de acuerdo con la cual habría habido varias oleadas de emigración fuera de África. Los genomas de individuos de África meridional apuntan a una divergencia humana hace entre 350.000 y 260.000 años. Esa zona del continente estuvo ocupada por el género *Homo* desde hace unos dos millones de años, con una importante fase de transición desde la Edad de Piedra temprana hacia la intermedia hace entre 600.000 y 200.000 años.

En *Early humans*, el arqueólogo Nick Ashton nos habla de un aspecto regional, aunque clave, de la transformación de la disciplina: el Paleolítico y el Mesolítico de lo que hoy constituyen las islas británicas. En efecto, pese a la dureza de la Edad del Hielo, los ancestros humanos colonizaron un enclave remoto del continente europeo. Los períodos glaciales e interglaciales tuvieron consecuencias de largo alcance para los primeros visitantes de la entonces península británica.

Ashton parte de una historia doméstica del Pleistoceno. Subía lentamente la marea mientras un grupo familiar deambulaba por el estuario. Sus miembros se detuvieron para ver pacer un rebaño de caballos. Un rinoceronte solitario se dibujaba a los lejos y se adivinaba la silueta de tres mamuts. Los padres no quitaban la mirada de unas hienas que estaban despedazando un alce a un tiro de piedra. Aquel día la familia viviría de raíces, crustáceos y bivalvos. Los tres niños parecían ajenos al peligro, pisando los charcos. El hijo mayor percibió el riesgo y les apremió a marcharse: tenían que alcanzar el bosque de pinos antes de que anocheciera. La familia siguió su camino dejando un rastro de huellas en el fango.

Esa escena se produjo hace casi un millón de años en Happisburgh, en la costa de Norfolk. La deducimos de los restos que nos han llegado: huesos, útiles de piedra y huellas de pisadas. Fue al comienzo de una larga historia de tropiezos y vueltas. A medida que el clima cambiaba, en ciclos recurrentes de temperaturas cálidas y frío polar, aquellos humanos retrocedían al Mediterráneo y, a cada ciclo de calor, se encaminaban de nuevo hacia el norte. Con la historia de *Homo* se va entretejiendo la evolución de aves, hábitats, mamíferos, insectos y flora, al compás de cuatro glaciaciones y cambios en el nivel del mar.

A las pisadas de Happisburgh, descubiertas por el propio Ashton y Martin Bates en mayo de 2013, se les otorga una

antigüedad de 800.000 años. El sedimento se había ido depositando en el estuario de un río desaparecido desde hacía mucho tiempo, cubierto posteriormente por la arena, lo que preservó su superficie. Se supone que el individuo que dejó la impronta pudo pertenecer a *H. antecessor*, que vivió en Atapuerca hace 800.000 años, fue sustituido por *H. heidelbergensis*, al que sucederían los neandertales hace unos 400.000 años, reemplazados después por los humanos modernos. Hace algo más de 40.000 años llegó a la isla el ser humano moderno, marginando a los neandertales residentes, confinados hasta su rápida extinción. Pese a las nuevas artes de caza y a maneras diferentes de acometer las rutinas, los humanos modernos lucharon por sentar pie en Bretaña.

Se trata de las pisadas de homínidos más antiguas conocidas fuera de África. Antes de ese espectacular hallazgo, las primeras pisadas de las que se tenía conocimiento eran las de Uskmouth, en Gales del Sur, fechadas hacia el año 4600 antes de nuestra era. Creían los paleontólogos que los homininos del período requerían un clima mucho más cálido. Pero los restos prehistóricos de Happisburgh, junto con ochenta herramientas paleolíticas de sílex, en su mayoría núcleos y lascas, evidencian que se habían adaptado al frío y que habían desarrollado métodos avanzados de caza, indumentaria, refugio y calentamiento mucho antes de lo que se venía sosteniendo.

Cuando se produjeron las pisadas de Happisburgh, el estuario ocupaba un valle abierto rodeado de bosques, con un clima similar al de la actual Escandinavia meridional. Lo habitarían mamuts, rinocerontes, hipopótamos, ciervos y bisontes perseguidos por grandes depredadores: dientes de sable, leones, lobos y hienas. Abundarían los venados y las plantas comestibles. Unos depósitos ricos en sílex suministrarían a sus moradores la materia prima para sus herramientas.

A medida que el clima se estabilizó en una franja templada de temperaturas, volvió el abedul y, andando el tiempo, el bosque caducifolio. Los cazadores, recolectores y pescadores explotaron la amplitud de recursos que podía ofrecer la región. Arcos y flechas de sílex dieron una palmaria ventaja en la caza, mientras las trampas y represas añadían el pescado y aves a la dieta. Aprovecharon la fructificación estacional de avellanas y otras nueces. Practicaron la quema regular de las espesuras para atraer a los venados. Se adentraron en otras islas con embarcaciones elementales. Muy pronto llegaría la agricultura.

—Luis Alonso



EL JINETE PÁLIDO
1918: LA EPIDEMIA QUE CAMBIÓ EL MUNDO
Laura Spinney
Crítica, 2018

Una guerra vírica mundial

Cien años después, un relato histórico rastrea con gran maestría las sendas que tomó la pandemia de gripe de 1918

La pandemia de gripe de 1918 afectó a casi un tercio de la población mundial de la época: unos 500 millones de personas. Ocasionó entre 50 y 100 millones de muertes; en comparación, los fallecidos en la Segunda Guerra Mundial se estiman en unos 70 millones. Siendo así, ¿por qué no se recuerda mejor esta catástrofe?

La periodista científica Laura Spinney reflexiona acerca de este enigma y sobre la naturaleza de la memoria histórica en su impactante obra *El jinete pálido*. En ella, la autora llega a la conclusión de que la pandemia es bien conocida por pequeñas tragedias personales, pero no como experiencia colectiva. Evitando una narrativa lineal, Spinney ha construido su relato a semejanza de la tradición talmúdica, en la que se añaden comentarios a un texto que se expande en círculos. La pandemia se halla en el centro, pero con ella se entrecruzan otras historias —reflexiones acerca de la práctica médica, investigaciones científicas, planificación urbana, creencias religiosas, sistemas políticos e ideas y prácticas sobre el modo de detener la enfermedad— que conducen hacia el modelo actual de catástrofe y a preocupaciones del calibre del sida, el zika o el ébola.

Uno de los mensajes de Spinney es que la pandemia fue un fracaso de la medicina, la ciencia, las autoridades civiles y militares, los Gobiernos y la sociedad, que, como colectivo, no pudo controlar ni frenar este azote. Se dice que la historia la escriben los vencedores; sin embargo, este desastre no tuvo ningún «vencedor» en cuyo interés pudiera perpetuarse la historia.

Aunque la pandemia se expandió por todo el globo, afectó de manera desproporcionada a África y Asia, con más keniatas muertos que escoceses y más indonesios que holandeses. La extensa investigación de Spinney ha sacado a la luz casos ocurridos en campos de batalla europeos, en minas de oro africanas, en las comunidades indígenas de Alaska y Shanxi, en la China rural, así como en la ciudad santa de Mashhad, en Persia, y en Río de Janeiro. El mundo se convirtió en una inmensa incubadora de la enfermedad y el virus se extendió en oleadas, la más mortífera de las cuales comenzó a mediados de 1918. ¿Saltó desde un ave o un cerdo al ser humano en alguna populosa comunidad rural china? ¿O alguna sustancia de las empleadas en el frente de guerra occidental, como el gas mostaza, provocó una mutación del patógeno que se propagó a gran velocidad entre las debilitadas tropas?

La investigación forense de Spinney en busca del «paciente cero» sugiere tres posibilidades: un soldado ingresado en un hospital militar en Francia, un campesino en Shanxi, o un granjero muy pobre en Kansas. De forma sugerente, la autora especula sobre la posibilidad de que estas alternativas estuviesen relacionadas: un obrero chino enfermo que viajó por EE.UU. con el Cuerpo de Trabajadores Chinos británico pudo haber contagiado a un recluta de Kansas la víspera de embarcar hacia el campo de batalla en Francia.

Una cosa sí es cierta: la denominación «gripe española» es difamatoria. La censura que sufrían los países en guerra silenció las noticias sobre los brotes de gripe en Flandes a comienzos de 1918. Los médicos franceses la llamaban «enfermedad número once». Los primeros reportajes ampliamente difundidos vinieron de un país neutral, España, sobre todo los que hacían referencia a la enfermedad del rey Alfonso XIII [*véase* «Y se le llamó gripe española», por Anton Erkoreka Barrena; Investigación y Ciencia, junio de 2017]. Así pues, y sin antecedentes previos, la gripe adquirió este inadecuado epónimo. A ello hay que sumar la inveterada costumbre de culpar al «otro»: en Senegal, la enfermedad se llamó gripe brasileña; en Brasil se culpó a los alemanes; en Polonia, a los bolcheviques; y en Persia, a los británicos.

Con el contagio global como devastador telón de fondo, las vidas y muertes descubiertas a través de cartas, diarios, biografías y memorias resumen este intenso relato. Spinney recurre a imágenes potentes. Encontramos a médicos que, «al igual que muchos comerciantes de vino de Burdeos», intentan definir los sutiles cambios de color de un paciente como desde un saludable rosado hasta un azul malsano; o leemos sobre una paloma moribunda que revolotea en las manos del dramaturgo Edmond Rostand, quien moriría tres semanas más tarde. Descubrimos extraños rituales populares para alejar la epidemia, como una «boda negra» en un cementerio judío en Odessa. Y se nos recuerda que apenas hay un cementerio de la época sin lápidas dedicadas a víctimas de la epidemia.

La pandemia se extinguió en 1920, pero su impacto persistió en comunidades y naciones, doblemente devastadas por la guerra y por la enfermedad. Muchos Gobiernos, estremecidos por no haber podido controlarla, reconocieron que la enfermedad infecciosa no era solo responsabilidad del individuo. A mediados de 1920, la mayor parte de los países europeos habían establecido programas de asistencia sanitaria. Alemania y Gran Bretaña ampliaron sus rudimentarios programas previos a la guerra. La recién creada Unión Soviética puso en marcha una organización centralizada para las comunidades urbanas que hacía hincapié en la salud pública. En EE.UU., las encuestas sobre salud y morbilidad se coordinaron en 1925. En China se estableció en 1930 un Servicio Nacional de Cuarentena. Aparecieron expertos en epidemiología, virología y farmacología. La Fundación Rockefeller, en Nueva York, se convirtió en un pilar importante de la salud pública internacional. Y el Instituto Pasteur de París fundó su primer establecimiento en ultramar, en Teherán, para estudiar las enfermedades infecciosas.

Hoy, con nuevas epidemias exacerbadas por los rápidos y constantes viajes internacionales de personas, animales y organismos virulentos, los Gobiernos están preparándose para una futura pandemia de gripe. Las principales preguntas son cuándo y cuán grande será. Organismos como la Organización Mundial de la Salud y los Centros para el Control y Prevención de Enfermedades de EE.UU. vigilan el cambio climático y los brotes de enfermedad, evalúan la evolución de cepas víricas para potenciales vacunas y preparan redes de laboratorios de emergencia y sistemas de vigilancia [*véase* «Evolución vírica en la era genómica», por Raúl Rabadán; Investigación y Ciencia, abril de 2012]. Los modelos epidemiológicos calculan que morirán entre 20 y 100 millones de personas: unas cifras aterradoras por más que constituyan una fracción de la población mundial más baja que la de 1918. La cuarentena, la prohibición de grandes reuniones y la vacunación masiva desempeñarán su papel tras las lecciones aprendidas hace un siglo.

Junto con una investigación ejemplar, la narrativa de Spinney está repleta de detalles fascinantes y poco habituales, como cuando al equipo de fútbol del Real Madrid se le añadió en su denominación el calificativo «real» como parte de un movimiento de «deportes para la salud» tras la pandemia de gripe. Incluso hay lugar para el actual presidente de los EE.UU., Donald Trump: la herencia de su abuelo, víctima de la gripe, fue el origen del imperio propiedad de la familia.

Tal y como el centenario de este gran suceso hace esperar, aparecerán otros libros sobre la pandemia. En este sentido, cabe concluir que *El jinete pálido* ha colocado el listón muy alto.

—Tilli Tansey
Universidad Queen Mary de Londres

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 546, págs. 207-208, 8 de junio de 2017. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2018

Con la colaboración de nature

NOVEDADES



ELOGIO DEL FUTURO
MANIFIESTO POR UNA CONCIENCIA CRÍTICA DE LA ESPECIE
Eudald Carbonell
Arpa Editores, 2018
ISBN: 978-84-16601-69-1
140 págs. (15,90 €)



DE MATASANOS A CIRUJANOS
JOSEPH LISTER Y LA REVOLUCIÓN QUE TRANSFORMÓ EL TRUCULENTO MUNDO DE LA MEDICINA VICTORIANA
Lindsey Fitzharris
Debate, 2018
ISBN: 9788499928234
320 págs. (22,90 €)



LA CIENCIA EN LA LITERATURA
UN VIAJE POR LA HISTORIA DE LA CIENCIA VISTA POR ESCRITORES DE TODOS LOS TIEMPOS
Xavier Duran
Edicions Universitat de Barcelona, 2018
ISBN: 978-84-475-4074-7
396 págs. (25 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

JUNIO

1968

La política de la revuelta

«Las revueltas urbanas estadounidenses de los últimos cuatro años comienzan a percibirse, entre los sociólogos, como una forma "prepolítica" de acción colectiva, más que como una serie de insensatos brotes de cólera ciega. Mientras que no hay consenso entre los investigadores, que concuerdan en lo variado y complejo del origen de los disturbios, se destaca la idea general de que los desórdenes representan algo más que una protesta de negros, algo más que una reacción repentina ante años de privaciones. Los disturbios se ven más bien como unas manifestaciones con implicaciones políticas, aunque no como acciones políticas organizadas conspirativamente. Esta opinión la ilustra un conjunto de artículos sobre violencia y desorden urbano publicados en un número reciente de *American Behavioral Scientist*. "La revuelta evoluciona como una forma de presión o protesta colectiva, en la que se reúne una gran multitud de personas alienadas, que comparten un destino común que ya no aceptan como necesario."»



1918: Un *boy scout* avisa a los civiles londinenses para que se pongan a cubierto durante una incursión aérea.



1968



1918



1868

El pan de cada día

«La desaparición de las piedras en las vías urinarias está particularmente bien documentada en Inglaterra. Entre 1772 y 1816, uno de cada 38 pacientes del Hospital de Norfolk y Norwich era tratado de piedras en la vejiga. En el mismo período, el número de muchachos de la Westminster School de Londres que sufrían del mismo mal era tan alto que disponían de una sala hospitalaria propia. Dama Kathleen Londsdale, del Colegio Universitario de Londres, sugiere que un factor que podría estar relacionado con el retroceso de la enfermedad es que el pan que los ingleses comían durante el siglo xix estaba fuertemente adulterado con creta y alumbre.»

1918

Dando la alarma

«Una organización londinense de propietarios de automóviles ha prestado un valioso servicio público en relación con las incursiones de los piratas aéreos alemanes. Cuando en la ciudad se recibe una alarma de incursión aérea, desde diversos puntos se disparan cohetes explosivos. Entonces, tal como muestra nuestra portada de la semana, los automóviles recorren las calles de la ciudad, sonando las bocinas para atraer la atención. Cada costado del vehículo lleva impreso un gran cartel con el aviso de "Pónganse a cubierto". Cuando pasa el peligro se muestra el reverso del cartel en el que se lee "No hay peligro". Un corneta de los *boy scouts* que viaja en el auto ayuda también a informar a los ciudadanos de que los hunos se han ido.»

1868

Una visita al Vesubio

«En una de las últimas reuniones de la Real Institución de Gran Bretaña, se invitó al profesor Tyndall a exponer lo que vio en su reciente visita al Vesubio. La campiña que circunda Nápoles es toda ella muy humeante y calurosa, lo que delata una gran actividad ígnea subterránea. También exploró algunas galerías calientes de la falda de la montaña, y visitó la Gruta del Perro, la famosa caverna, cuyo suelo está cubierto de una capa de varios decímetros de gas carbónico [dióxido de carbono]. Ese denso e invisible gas fluye al exterior de la caverna en una abundante corriente, y apaga las antorchas al aire libre cuando estas se arriman al suelo. Cuando llegan visitantes, se sujeta un perrillo junto a la cueva hasta que medio se sofoca por su inmersión en el gas. El profesor Tyndall protestó contra la crueldad de esa práctica, la cual, dice, no sirve a propósito útil alguno y debe interrumpirse.»

Cubos de basura

«No hay ni una pizca de nada en el montón de basura que el basurero retira de nuestra casa que no se recupere con rapidez y se utilice provechosamente. Tan pronto los desperdicios son transportados al vertedero del contratista, caen sobre ellos las llamadas "escaladoras". Son mujeres que, criba en mano, hacen de forma mecánica lo que los sabios hacen químicamente en sus laboratorio: disgregar una masa en sus componentes mediante un tosco examen. De estos, los más apreciados son los trozos de carbón residuales y lo que llaman "brisa", o polvo de carbón y cenizas medio consumidas. Resulta difícil de imaginar la cantidad de desechos del carbón que en esa forma retorna a los hogares londinenses.»

Medicina moderna

«En Francia está en auge el consumo de carne cruda como tratamiento de la anemia y la tisis. Pero a fin de que pueda servirse del modo menos desagradable para la delicada sensibilidad del paciente, se prepara con el nombre de tabletas musculinas, que se hacen cubriendo filetes de buey crudos con jalea de frutas y azúcar glaseado.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXVIII, N.º 23, 8 DE JUNIO DE 1918

EVOLUCIÓN
El éxito evolutivo de los dinosaurios
Stephen Brusatte

Nuevos fósiles y análisis ponen en entredicho la visión tradicional sobre el modo en que los dinosaurios llegaron a dominar el planeta.



ASTRONOMÍA
Mensajeros del cielo
Ann Finkbeiner

La reciente capacidad de los astrónomos para ver los mismos eventos cósmicos mediante luz, partículas y ondas gravitacionales —una combinación llamada «astronomía de multimensajeros»— les proporciona una imagen más completa de algunos de los fenómenos más misteriosos del universo.

RECURSOS NATURALES
¿Compensa la minería en aguas profundas?
Thomas Peacock y Matthew H. Alford



La carrera por explotar y proteger el fondo oceánico acaba de comenzar.



INFORME ESPECIAL:
EL FUTURO DE LA MEDICINA

ENFERMEDADES EMERGENTES EN UN MUNDO CAMBIANTE

Prever la próxima pandemia
Alessandro Vespignani

Las infecciones, en cifras

El futuro de la vacuna contra la gripe
Dina Fine Maron

Enfermedades favorecidas por el cambio climático
Lois Parshley

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek



DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:

Javier Grande: *Apuntes, El misterio de las explosiones rápidas de radio y Plutón al descubierto*; Andrés Martínez: *Apuntes*; Roser Mas Malavila: *Ecografías para examinar microorganismos intestinales*; Luis Cardona: *El plancton versátil*; Ana Mozo: *El árbol del cáncer*; Fabio Teixidó: *Colapso ártico*; Xavier Roqué: *Las jóvenes científicas del «Rockefeller» (1931-1939)*; Lorenzo Gallego: *La necesidad de una vacuna universal contra la gripe*; Bartolo Luque: *¿Cómo se forman las conchas marinas?*; José Ó. Hernández Sendín: *El impulso nervioso, reimaginado*; Ramón Muñoz Tapia: *Auroras boreales caseras*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España